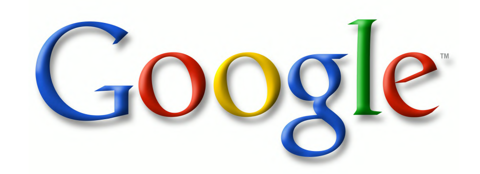
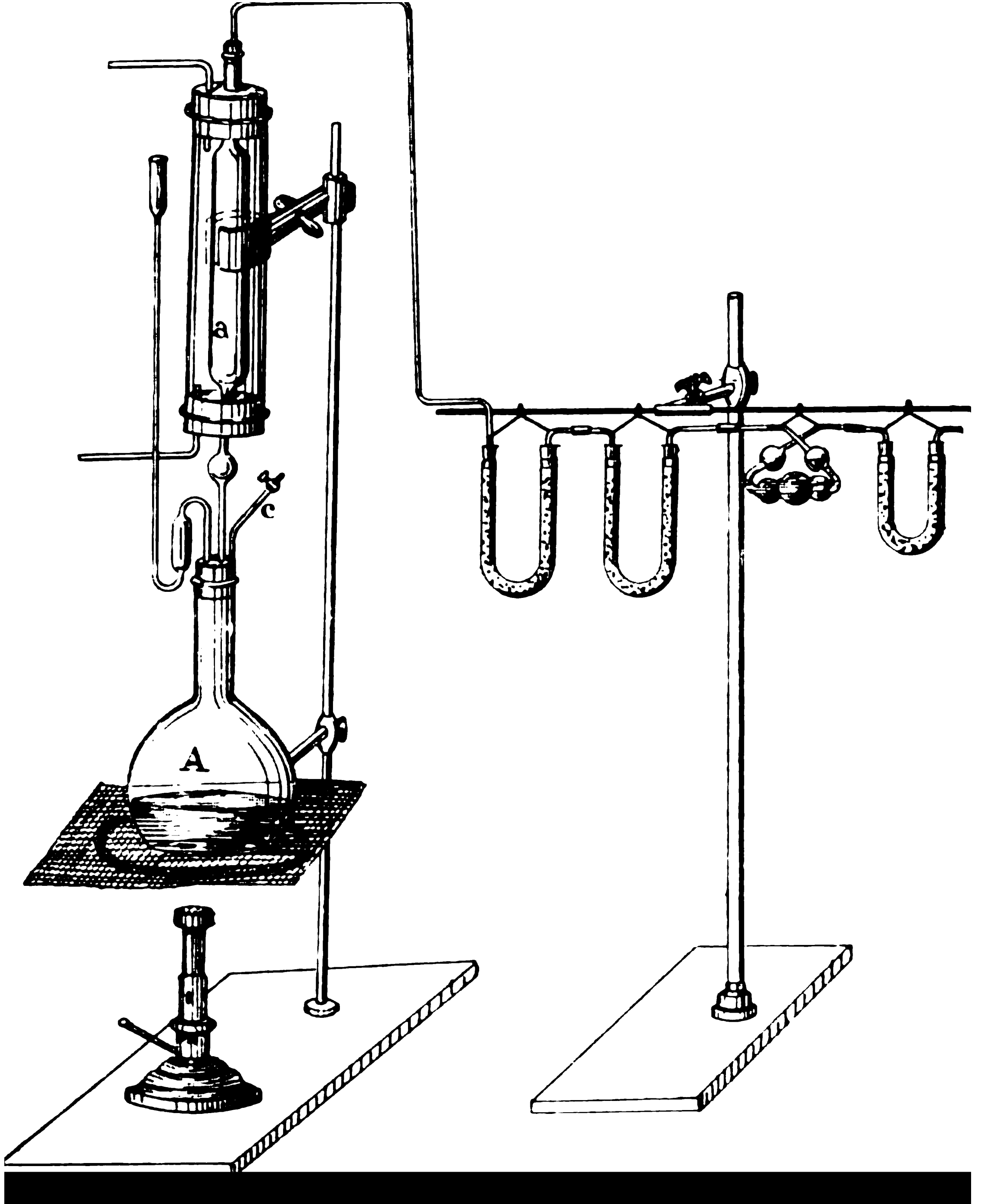
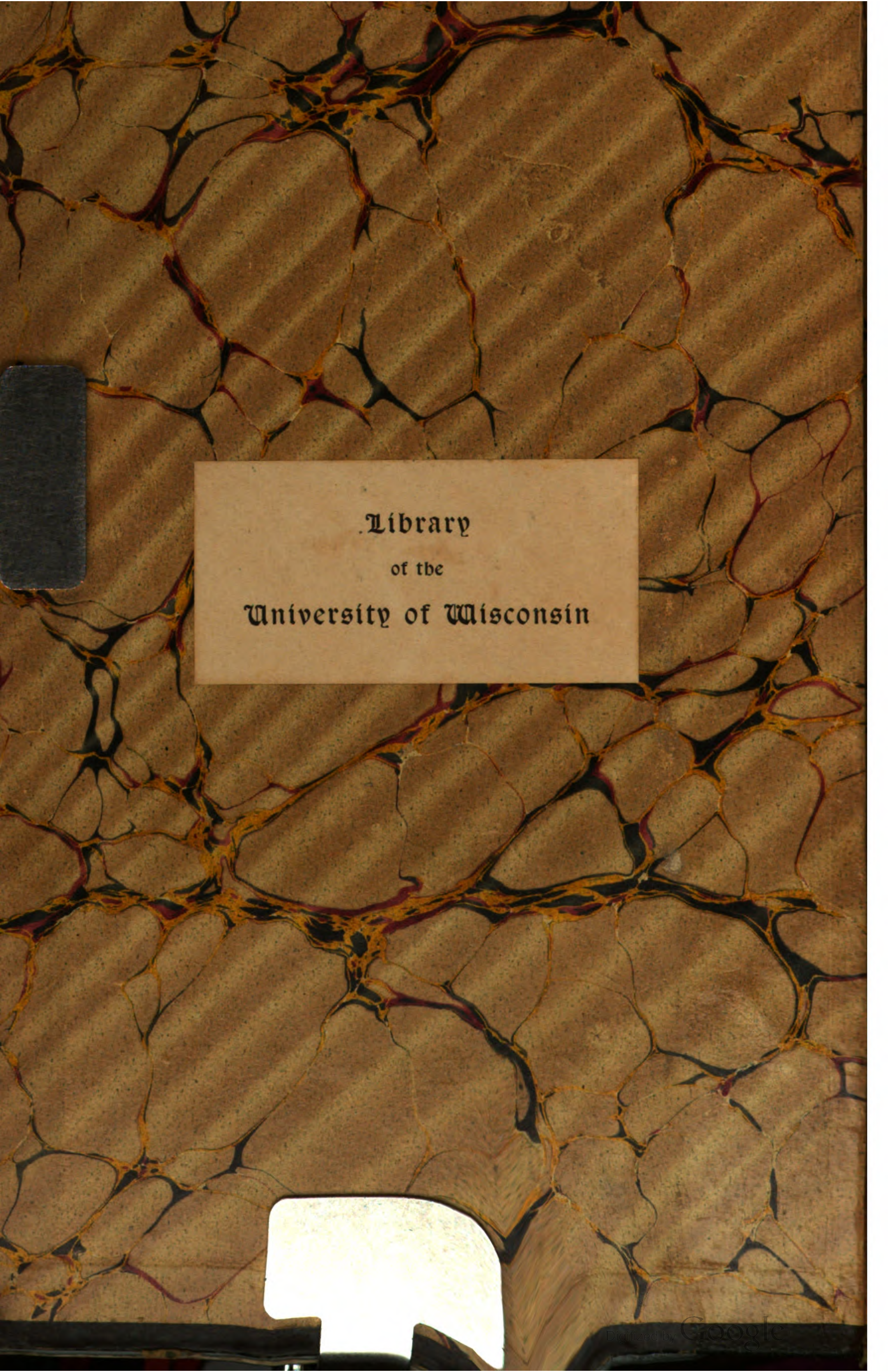
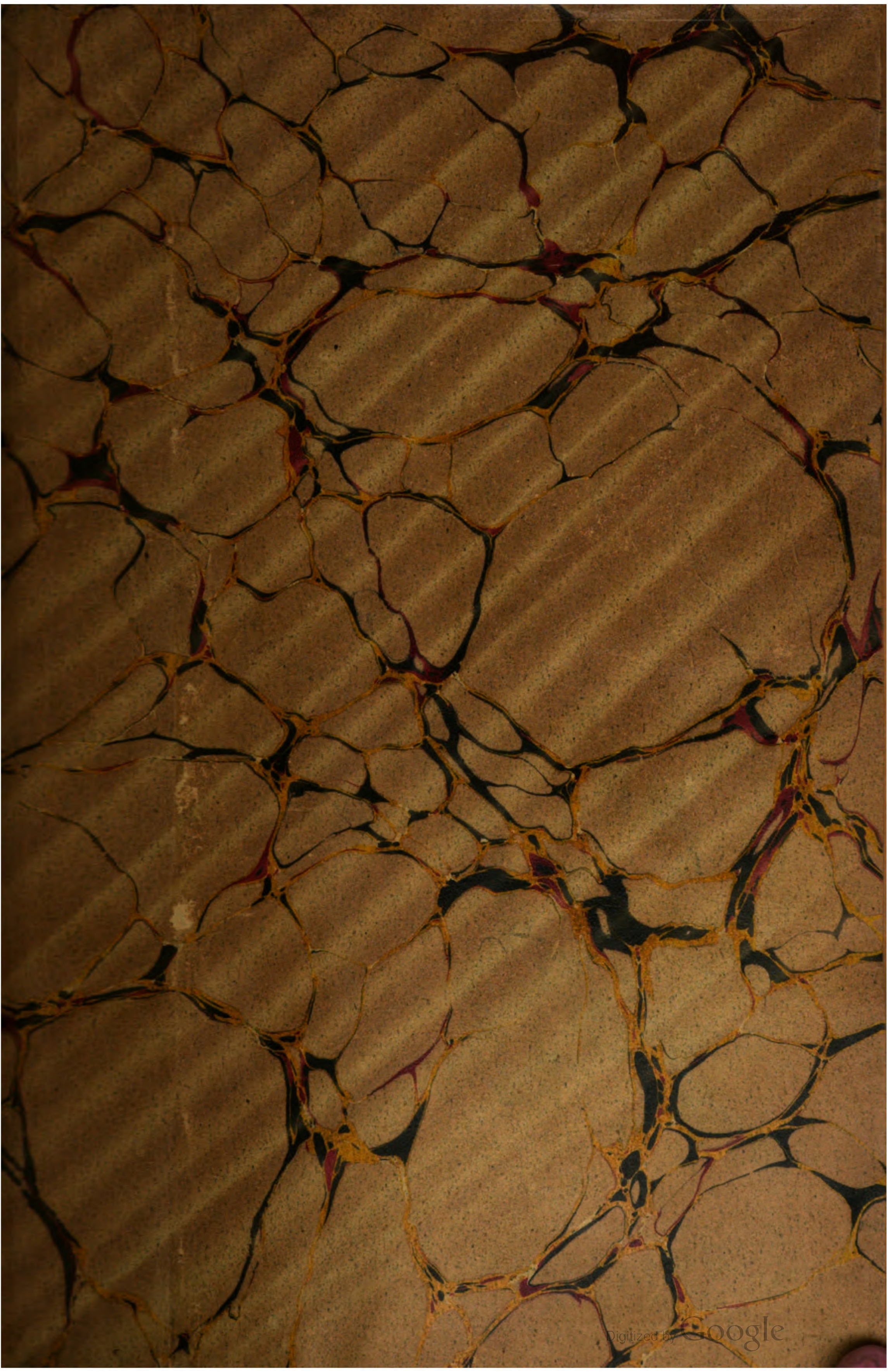




Chimie appliquée à l'art l'ingénieur

Charles Léon Durand-Claye, Dérôme, René Féret


Library
of the
University of Wisconsin



CHIMIE APPLIQUÉE

A L'ART DE L'INGÉNIEUR

Tous les exemplaires de la CHIMIE APPLIQUÉE A L'ART DE L'INGÉNIEUR

(2[e] *édition*) *devront être revêtus de la signature de l'un des auteurs.*

ENCYCLOPÉDIE DES TRAVAUX PUBLICS
FONDÉE PAR M.-C. LECHALAS, INSPECTEUR GÉNÉRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES
Médaille d'or à l'Exposition universelle de 1889

CHIMIE APPLIQUÉE

A L'ART DE L'INGÉNIEUR

SECONDE ÉDITION, REVUE ET CONSIDÉRABLEMENT AUGMENTÉE

PREMIÈRE PARTIE

ANALYSE CHIMIQUE DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

PAR

Ch.-Léon DURAND-CLAYE,
Inspecteur général, ancien professeur et ancien directeur du laboratoire à l'École des Ponts et Chaussées

ET

DERÔME,
Chimiste de ce laboratoire

SECONDE PARTIE

ÉTUDE SPÉCIALE DES MATÉRIAUX D'AGRÉGATION DES MAÇONNERIES

PAR

René FERET,
Ancien élève de l'École Polytechnique
Chef du laboratoire des Ponts et Chaussées de Boulogne-sur-Mer

PARIS

LIBRAIRIE POLYTECHNIQUE
BAUDRY ET Cie, LIBRAIRES-ÉDITEURS
RUE DES SAINTS-PÈRES, 15
MÊME MAISON A LIÈGE

1897

TABLE DES MATIÈRES

PREMIÈRE PARTIE

ANALYSE CHIMIQUE DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION, DES COMBUSTIBLES, DES EAUX, DES TERRES, ENGRAIS, ETC.

CHAPITRE PREMIER

Généralités

§ 1er. — Rappel des propriétés essentielles des composés chimiques les plus usuels.

§ 2. — Procédés généraux de l'analyse chimique

§ 3. — Des réactifs

CHAPITRE II

Matériaux de maçonnerie

§ 1er. — Composition chimique des chaux et ciments

§ 2. — Composition chimique des sables, des pouzzolanes, de l'argile et du platre.

§ 3. — Analyse des calcaires

§ 4. — Analyse des chaux et ciments

CHAPITRE III

Métaux

CHAPITRE IV

Matériaux divers

§ 2. — ASPHALTES ET BITUMES

§ 3. — COMBUSTIBLES MINÉRAUX

CHAPITRE V

Eaux naturelles, terres, amendements et produits agricoles

§ 1er. — EAUX NATURELLES

§ 2. — TERRES, AMENDEMENTS, ENGRAIS, ET PRODUITS AGRICOLES

1° *Engrais et produits agricoles*

2° *Terres et amendements*

APPENDICE

SECONDE PARTIE

ÉTUDE SPÉCIALE DES MATÉRIAUX D'AGRÉGATION DES MAÇONNERIES

CHAPITRE PREMIER

Historique

CHAPITRE II

Classification

CHAPITRE III

Fabrication

CHAPITRE IV

Propriétés

CHAPITRE V

Essais

CHAPITRE VI

Mortiers



§ 2. — MORTIERS A DEUX ÉLÉMENTS SOLIDES

§ 3. — MORTIERS A TROIS ÉLÉMENTS SOLIDES

§ 4. — FABRICATION DES MORTIERS

CHAPITRE VII

Bétons

§ 1er. — COMPOSITION

CHAPITRE VIII

Applications

TABLEAUX

Comparaison de divers liants hydrauliques

PREMIÈRE PARTIE

ANALYSE CHIMIQUE

DES

MATÉRIAUX DE MAÇONNERIE

DES MÉTAUX, DES MATÉRIAUX DIVERS

(PEINTURES, ASPHALTES, COMBUSTIBLES),

DES EAUX, DES TERRES, ENGRAIS, ETC.

INTRODUCTION

L'art de l'ingénieur a fait de grands progrès depuis le commencement du siècle. Il n'est pas douteux que ces progrès ne soient dus, en partie, à la diffusion de plus en plus étendue des connaissances chimiques. Les matériaux que la nature ou l'industrie mettent à la disposition des ingénieurs ne sont pas toujours de composition simple et ne sont jamais absolument purs. Les corps étrangers qu'ils renferment modifient parfois profondément leurs qualités et produisent des effets considérables sur la résistance des constructions. L'ingénieur doit donc, non seulement connaître la nature de ces influences, mais savoir constater la présence des divers corps auxquels elles sont dues et en mesurer la proportion.

Tout au moins, s'il n'est pas en mesure de procéder par lui-même aux analyses chimiques, doit-il se rendre compte des procédés employés par les laboratoires spécialement outillés pour cet objet, afin de leur envoyer des échantillons convenablement choisis, d'indiquer les renseignements qui lui sont particulièrement utiles et de se rendre compte de la valeur des résultats qui lui sont communiqués.

Les procédés d'analyse applicables aux matériaux de construction sont décrits dans les traités généraux de chimie ; mais ils s'y trouvent confondus avec ceux qui ont pour objet des recherches scientifiques. Il a semblé qu'il pouvait être intéressant de les en dégager et de les présenter à part avec tous les détails nécessaires. C'est le

but que l'on s'est proposé d'atteindre dans le présent ouvrage.

Les matériaux dont il est fait usage dans les constructions sont fort nombreux. On les classera en plusieurs catégories, à chacune desquelles sera consacré un chapitre spécial.

On s'occupera d'abord des matériaux qui entrent dans la constitution des maçonneries. Les travaux de l'illustre Vicat sur ce sujet ont été, on peut le dire, le point de départ de la chimie appliquée à l'art de l'ingénieur.

On traitera ensuite de l'analyse des métaux, qui ont pris une si large place dans les constructions modernes, et dont les propriétés sont si profondément modifiées quelquefois par la présence de corps étrangers, même en minime proportion.

On classera ensemble, dans un autre chapitre, divers autres matériaux, tels que les peintures et les asphaltes, dont la pureté est essentielle à leur bonne conservation. On y ajoutera les combustibles minéraux, qui ne sont pas, il est vrai, des matériaux de construction, mais dont il est fait usage sur une si grande échelle dans les préparations industrielles, et dont la qualité influe souvent beaucoup sur les produits.

Enfin, on terminera en traitant de certaines analyses ne se rapportant pas aux constructions, mais sur lesquelles les ingénieurs peuvent être appelés à porter leur attention, comme celles des eaux naturelles, du sol, des engrais et des produits agricoles.

Dans un premier chapitre, on rappellera sommairement les notions générales de chimie qui trouvent leur plus fréquente application dans l'analyse des matériaux, et on donnera quelques renseignements sur les procédés les plus usuels des opérations de laboratoire.

CHAPITRE PREMIER

GÉNÉRALITÉS

§ 1. — Rappel des propriétés essentielles des composés chimiques des plus usuels

1. Silice. — La silice est un des corps les plus répandus à la surface de la terre. On l'y trouve soit à l'état isolé, soit en combinaison. A l'état isolé, elle forme le quartz, le cristal de roche, les sables quartzeux, les grès, etc. Elle se rencontre en dissolution dans quelques eaux naturelles, notamment dans les geysers d'Islande. En combinaison avec l'alumine, elle constitue l'argile ; elle se rencontre aussi, combinée avec l'alumine, les oxydes de fer, les alcalis, la magnésie et la chaux, dans les granites et toutes les roches primitives.

La silice et les silicates naturels se distinguent par leur inertie chimique. A la température ordinaire, ils résistent à l'action des bases les plus fortes comme des acides les plus énergiques.

Portée au rouge ou au blanc, la silice devient, au contraire, un acide puissant. Comme elle est absolument fixe et ne se volatilise à aucune température, elle finit par déplacer l'acide des sels avec lesquels on la chauffe à un degré de plus en plus élevé. La silice peut ainsi se combiner avec toutes les bases fixes.

Si donc on porte au rouge un creuset de platine où l'on a mis du carbonate de potasse mélangé avec du sable ou du quartz pulvérisé, l'acide carbonique est chassé, et la silice se combine avec la potasse à l'état de silicate de potasse. Ce composé est fusible et forme au fond du creuset un culot, qui se solidifie en refroidissant. La matière, reprise par l'eau, se dissout et constitue ce qu'on appelle la *liqueur des cailloux*.

L'affinité de la silice, si énergique aux températures élevées par suite de sa fixité, redevient, au contraire, très faible dans les conditions ordinaires ; l'acide carbonique lui-même l'élimine, comme on le voit en faisant passer un courant de ce gaz dans la liqueur des cailloux. Quelques gouttes d'un acide fort déterminent, dans cette liqueur, un précipité de silice qui apparaît sous forme d'une gelée floconneuse.

Cette gelée est de la silice hydratée qui ne participe pas à l'inertie de la silice naturelle. Elle est sensiblement soluble dans l'eau, même acidulée, et se combine aux bases alcalines fixes. Aussi, les liqueurs où on la précipite en conservent toujours une partie en dissolution. Si elles sont très étendues, elle y reste dissoute en entier, et le précipité n'apparaît pas.

La présence de la silice dissoute, même en très faible proportion, est une source de grands embarras dans les analyses, parce qu'elle bouche les pores des filtres. Aussi doit-on l'éliminer soigneusement. On y parvient, grâce à la propriété suivante :

Si l'on concentre lentement par la chaleur une liqueur acide qui tient de la silice en dissolution, on la voit au bout d'un certain temps se transformer en une masse transparente, ayant l'aspect d'une gelée de fruits ; c'est de la silice hydratée ou gélatineuse. La chaleur lui enlève

ensuite peu à peu son eau de combinaison et l'amène à l'état d'une poudre blanche.

Si la dessiccation a été complète, cette poudre jouit de toutes les propriétés chimiques de la silice naturelle, c'est-à-dire qu'elle est tout à fait inerte et insensible aux réactifs.

L'acide fluorhydrique est le seul réactif qui attaque la silice et les silicates.

La silice se dose toujours à l'état de liberté. Lorsqu'on l'a séparée des éléments avec lesquels elle se trouvait combinée, on la calcine et on la pèse.

La composition centésimale de la silice anhydre est de 46,66 de silicium pour 53,34 d'oxygène. On lui donne le plus habituellement aujourd'hui la formule SiO^2. L'acide normal correspond à SiO^4H^4; mais il existe beaucoup d'autres acides, dérivés de celui-là, par la perte d'une ou plusieurs molécules d'eau, qui donnent aux silicates où ils se trouvent simultanément en présence une grande complexité et l'apparence de composés à proportions non définies.

2. Acide carbonique. — L'anhydride carbonique se rencontre en liberté dans l'air atmosphérique et dans les eaux naturelles, mais en petite proportion. Il existe en quantités énormes, à l'état de combinaison, dans les roches calcaires, qui forment les pierres à chaux et la plupart des pierres à bâtir. On trouve aussi des roches de carbonate de magnésie, de baryte, de fer.

L'anhydride carbonique est un gaz lourd, incolore, légèrement sapide, et soluble dans l'eau, qui en prend volume pour volume à la pression où il se trouve.

Il est avidement absorbé par les bases fortes, notamment par les alcalis caustiques et par la chaux. Lorsque

l'on manie ces bases, il ne faut pas oublier que l'air atmosphérique, et surtout l'air confiné des laboratoires, renferme une dose très sensible de ce gaz.

Les carbonates sont tous insolubles dans l'eau, sauf ceux à base alcaline.

Les carbonates de chaux et des autres bases alcalino-terreuses sont insolubles dans l'eau, mais se dissolvent partiellement dans une eau chargée d'acide carbonique, où ils forment des bicarbonates solubles. La chaleur, l'agitation, une diminution de pression, suffisent pour en chasser l'excès d'acide carbonique et les ramener à l'état de carbonates simples insolubles qui se précipitent.

Le gaz carbonique se dégage facilement de ses combinaisons. Portés à une température suffisante, les carbonates perdent leur acide et sont ramenés à l'état de bases simples ; le calcaire, par exemple, se transforme en chaux. Il n'y a d'exception que pour les carbonates alcalins, qui retiennent leur acide à toute température.

Les autres acides déplacent l'acide carbonique en s'emparant de sa base. Si la réaction a lieu dans un liquide, on voit des bulles de gaz se dégager avec effervescence. Quand la liqueur est très étendue, le dégagement ne se produit pas, le volume de gaz ne dépassant pas celui qu'elle peut retenir en dissolution. Pour l'en débarrasser complètement, il faut la faire bouillir.

Le dosage de l'anhydride carbonique est délicat. On indiquera plus loin, lorsqu'il sera nécessaire, les procédés applicables à chaque cas particulier.

La composition de ce gaz est, en poids, de 27,27 de carbone pour 72,73 d'oxygène ; sa formule est CO^2.

Cet anhydride ne se combine pas à l'eau pour donner un acide normal.

3. Acide sulfurique. — L'acide sulfurique est un des éléments du gypse, ou pierre à plâtre, très abondant à la surface du globe. Il se trouve aussi à l'état de sulfate de baryte.

C'est un des acides les plus énergiques. Il absorbe l'eau avec avidité, en produisant une forte élévation de température.

Les sulfates sont tous solubles dans l'eau, à l'exception du sulfate de baryte. Le sulfate de chaux l'est peu : l'eau n'en dissout pas plus de 2 gr. 1/2 par litre. Cette quantité, négligeable dans un grand nombre d'opérations industrielles, est importante en analyse chimique. Les sulfates de plomb et d'argent sont dans le même cas.

Les sulfates sont peu solubles dans l'alcool. Ce réactif donne un précipité dans leurs solutions concentrées. Le sulfate de chaux devient même à peu près complètement insoluble, dès que la proportion de l'alcool est égale à celle de l'eau.

Tous les sulfates solides, excepté celui de baryte, sont décomposés à froid par les solutions des carbonates alcalins. Au bout d'un contact suffisamment prolongé, la décomposition est complète, et la liqueur renferme un sulfate alcalin, la base du sulfate primitif étant passée à l'état de carbonate insoluble. Ainsi le sulfate de chaux et le carbonate de potasse se transforment en sulfate de potasse et carbonate de chaux:

$$SO^4Ca + CO^3K^2 = SO^4K^2 + CO^3Ca$$ [1].

La présence de l'acide sulfurique ou des sulfates est

[1] On emploiera dans le cours de cet ouvrage la notation atomique, qui est la plus répandue aujourd'hui. Une table placée à la fin du volume permettra, au besoin, de passer des poids atomiques aux équivalents.

très facile à constater dans une liqueur. Il suffit d'y verser une dissolution d'un sel de baryte, après s'être assuré qu'elle est acide, ou l'avoir rendue telle par l'addition d'un peu d'acide chlorhydrique.

L'acide sulfurique se dose à l'état de sulfate de baryte que l'on pèse après calcination. Le poids trouvé multiplié par 0,3433 donne le poids correspondant d'anhydride sulfurique. La formule chimique de cet anhydride est SO^3; il renferme 40 de soufre pour 60 d'oxygène.

4. Chlore et acide chlorhydrique. — Le chlore se rencontre à l'état de chlorure dans les eaux naturelles et dans un grand nombre de produits de l'économie animale et végétale.

Tous les chlorures sont solubles, sauf dans quelques rares minéraux, dont on n'a pas à s'occuper ici.

Portés à une température élevée, ils se comportent de diverses façons. Les uns, comme les chlorures de magnésium, d'aluminium, de fer, de manganèse, se décomposent et perdent leur chlore. D'autres restent fixes, comme les chlorures de calcium, de baryum et de potassium. Les chlorures alcalins sont sensiblement volatils au rouge.

Le caractère distinctif des chlorures est le précipité cailleboté qu'y forme le nitrate d'argent; ce précipité est insoluble dans l'acide azotique et soluble dans l'ammoniaque. La lumière du jour et surtout les rayons solaires le font passer au violet foncé.

On peut reconnaître aussi la présence du chlore à l'odeur du gaz qui se dégage lorsqu'on chauffe la liqueur, après y avoir ajouté un peu d'acide sulfurique et du bioxyde de manganèse.

Le dosage du chlore se fait à l'état de chlorure d'ar-

gent. Le poids du précipité calciné, multiplié par 0,2474, donne celui du chlore. On dose aussi le chlore par les procédés volumétriques.

5. Acide azotique. — L'acide azotique, à l'état de nitrate de chaux, de magnésie, etc., se trouve dans les efflorescences, dites salpêtres, qui recouvrent les parties basses et humides des édifices.

L'acide azotique attaque presque tous les métaux, en leur cédant une partie de son oxygène et en se combinant avec l'oxyde produit. La portion qui a perdu son oxygène se dégage dans l'atmosphère sous forme de vapeurs nitreuses ou rutilantes.

Tous les azotates sont solubles dans l'eau, de sorte qu'on ne peut reconnaître l'acide azotique, ni en obtenir la séparation, par la méthode ordinaire des précipités insolubles.

Voici quelques procédés qui permettent d'en constater la présence :

Les azotates déflagrent lorsqu'on les projette sur des charbons ardents, et produisent une détonation quand on les chauffe avec du charbon en poudre.

Si on place dans un tube bouché 1 ou 2 centimètres cubes de la dissolution d'un azotate, avec un peu d'acide sulfurique et de tournure de cuivre métallique, on obtient soit à froid, soit en chauffant légèrement, des vapeurs rutilantes. Quand la liqueur est très étendue, il convient de la concentrer au préalable.

On peut encore placer, au fond d'un tube bouché, 1 ou 2 centimètres cubes de la matière additionnée d'acide sulfurique concentré, puis verser par dessus avec précaution une dissolution de sulfate de protoxyde de fer, de manière à éviter le mélange des deux liqueurs. En

laissant reposer, on voit se former, au contact des deux liquides, après un temps plus ou moins long, une couronne brune qui indique la présence de l'acide nitrique.

On peut mêler la liqueur avec un peu d'acide chlorhydrique et la colorer légèrement en bleu, au moyen de sulfate d'indigo. En faisant chauffer le mélange, on le voit se décolorer, s'il renferme de l'acide azotique. Cette réaction, employée avec certaines précautions, a été appliquée au dosage des très petites quantités d'acide azotique qui se trouvent dans les eaux naturelles.

On peut, enfin, constater les moindres traces d'azotates, par exemple dans le résidu de l'évaporation des eaux courantes, en délayant la matière dans de l'acide sulfurique concentré, et versant ensuite un peu de brucine, qui produit une coloration intense. Cette réaction est d'une extrême sensibilité.

Pour doser l'acide azotique, il faut commencer par l'isoler. Cette opération est assez délicate et sera décrite plus loin (n° 134). Une fois isolé, il se détermine, soit par les liqueurs titrées, soit par un des moyens suivants. On fait chauffer sa dissolution avec un excès d'oxyde de plomb, on dessèche la masse et on la pèse. Le poids de l'acide azotique est la différence entre celui de la masse sèche et celui de l'oxyde employé. La seconde méthode, applicable même quand il y a de l'acide sulfurique dans la dissolution, consiste à verser dans la liqueur de l'eau de baryte, et à y faire passer ensuite un courant d'acide carbonique, qui précipite la baryte en excès. On fait bouillir pour chasser l'excès d'acide carbonique, et on filtre. La liqueur ne renferme plus que de l'azotate de baryte, que l'on dessèche, après évaporation, et que l'on pèse. On peut aussi y précipiter la baryte par l'acide

sulfurique et calculer par les équivalents le poids d'acide azotique correspondant à celui du précipité.

L'anhydride azotique se compose de 25,93 d'azote pour 74,07 d'oxygène; sa formule est Az^2O^5, et celle de l'acide, AzO^3H.

6. Acide phosphorique. — L'acide phosphorique forme trois séries de sels : les sels monobasiques, bibasiques et tribasiques. Comme les phosphates alcalins bibasiques sont neutres au tournesol, on a improprement désigné les sels des trois séries sous les noms de phosphates acides, neutres et basiques.

C'est le phosphate tribasique de chaux qui forme la majeure partie des matières minérales des os. Il constitue également un grand nombre de roches, apatites, phosphorites, nodules, etc.

Les phosphates acides sont solubles dans l'eau. Les phosphates bibasiques et les phosphates tribasiques y sont insolubles, sauf ceux à base d'alcalis ; mais ils se dissolvent dans les acides forts. Si on verse dans la dissolution d'un phosphate non alcalin une base soluble, telle que l'ammoniaque, il se produit un précipité qui disparaît par une addition d'acide et se reproduit si on ajoute de l'ammoniaque.

La présence de l'acide phosphorique, ou celle de ses combinaisons est facilement décelée si l'on fait chauffer leur solution dans l'acide nitrique avec un léger excès d'une dissolution dans le même acide de molybdate d'ammoniaque. Il se forme, au bout de peu de temps, un précipité dense et grenu d'une belle couleur jaune clair de phospho-molybdate d'ammoniaque.

Ce précipité est caractéristique. Cependant il faut s'être préalablement assuré qu'il n'y a, dans la liqueur, ni silice,

ni acide arsénique, qui formeraient des précipités analogues.

Les phosphates alcalins donnent un précipité, lorsqu'on y verse un sel ammoniacal de magnésie additionné d'ammoniaque ; ce précipité, très lent à se produire, n'est complètement insoluble que dans une liqueur froide et fortement ammoniacale. Il se présente alors sous forme de petits cristaux aciculaires, restant adhérents aux parois du vase ; leur composition est celle d'un phosphate tribasique à 2 molécules de magnésie pour 1 d'ammoniaque.

C'est sous cette forme qu'on précipite l'acide phosphorique, et c'est après calcination qu'on le pèse ; il est alors à l'état de pyrophosphate.

La formule de l'anhydride phosphorique est P^2O^5, et celle de l'acide phosphorique ordinaire, ou orthophosphorique, PO^4H^3. On connaît encore un premier anhydride de ce corps, l'acide métaphosphorique PO^3H, et un produit condensé, l'acide pyrophosphorique $P^2O^7H^4$.

7. Fluor. — Le fluor se rencontre principalement dans la roche connue sous le nom de spath fluor, ou fluorure de calcium.

On en reconnaît la présence en réduisant en poudre l'échantillon et plaçant cette poudre avec de l'acide sulfurique dans un creuset de platine, que l'on recouvre d'une plaque de verre. Si l'on chauffe légèrement le fond du creuset, il se dégage de l'acide fluorhydrique, qui attaque et dépolit le verre.

Quand le fluor se trouve dans une roche qui renferme des silicates, le gaz qui se dégage est du fluorure de silicium. On place alors sur la face inférieure du verre une goutte d'eau, qui décompose le gaz et se charge de silice.

Le fluor se dose par différence. Lorsque l'on en a constaté la présence dans une roche, on la traite par l'acide sulfurique, qui fait dégager le fluor à l'état d'acide fluorhydrique, on dessèche et on pèse le sulfate obtenu. On en déduit le poids du fluor par le calcul des équivalents.

8. Alumine. — L'alumine se trouve isolée et cristallisée dans la nature, sous forme de corindon opaque ou hyalin, de saphir, de rubis. Elle existe en immense quantité en combinaison avec la silice, soit à l'état d'argile, soit dans les minéraux complexes qui constituent les roches primitives. La plupart des roches calcaires renferment de l'argile.

L'alumine naturelle est inattaquable aux bases et se dissout difficilement dans les acides. Elle se comporte à peu près comme la silice. Ainsi, si on la chauffe au rouge dans un creuset avec du carbonate de potasse, elle s'y fond et forme avec la potasse une combinaison soluble dans l'eau. Cette combinaison se distingue de la liqueur des cailloux en ce que les acides forts en excès n'y laissent pas de précipité, même lorsqu'elle est très concentrée.

Lorsque l'alumine a été séparée à froid de ses combinaisons, elle est hydratée et se dissout très facilement dans la potasse.

Les sels d'alumine traités par l'ammoniaque donnent un précipité blanc d'alumine hydratée qui ne se redissout pas dans un excès de réactif.

La potasse produit le même précipité, mais un excès de potasse le redissout. Si on vient alors à y ajouter un sel quelconque d'ammoniaque, le précipité reparaît de nouveau.

Les carbonates alcalins décomposent les sels d'alu-

mine; le précipité est de l'alumine hydratée. Le sulfhydrate d'ammoniaque produit la même réaction.

Si l'on recueille l'alumine hydratée obtenue par ces réactions, et qu'on la dessèche en la calcinant, elle repasse au même état que l'alumine naturelle, et donne une poudre blanche et farineuse, semblable à la silice et inattaquable aux acides comme aux bases. Un long séjour à chaud au contact des acides forts, et surtout de l'acide sulfurique, finit toutefois par la dissoudre.

On obtient la même alumine par la calcination de ses sels solubles, et notamment de l'alun ammoniacal, qui est un sulfate double d'alumine et d'ammoniaque.

Les substances organiques solubles et non volatiles, telles que l'acide tartrique, l'acide citrique, le sucre, empêchent les réactions indiquées ci-dessus. Dans les liqueurs qui en renferment, l'alumine n'est plus précipitée ni par l'ammoniaque, ni par les carbonates alcalins, ni par le sulfhydrate d'ammoniaque.

L'alumine est généralement obtenue à l'état isolé dans les analyses. Pour la doser, on n'a qu'à la calciner et à la peser.

La formule de l'alumine est Al^2O^3 ; elle renferme 53,40 pour 100 d'aluminium et 46,60 d'oxygène.

9. Oxydes de fer. — Le fer oxydé est mélangé à presque tous les matériaux, où il ne joue qu'un rôle secondaire quant à leurs propriétés essentielles. Mais il leur communique souvent une coloration verte, jaune ou rouge, suivant son état chimique.

On distingue deux oxydes de fer : le protoxyde de fer et le peroxyde, auxquels correspondent les sels ferreux et les sels ferriques, désignés encore sous les noms de sels au minimum et sels au maximum.

Le protoxyde de fer ne peut être facilement isolé. Aussitôt au contact de l'air, il absorbe l'oxygène et se transforme partiellement en peroxyde de fer (Fe^2O^3) qui se combine avec 1 partie du protoxyde (FeO), pour donner l'oxyde magnétique (Fe^3O^4).

On le trouve à l'état de combinaison dans un grand nombre de minéraux et notamment dans le fer spathique, minerai formé de carbonate ferreux.

Il colore les fondants en vert intense; c'est lui qui donne sa couleur au verre à bouteilles.

Les sels ferreux se reconnaissent aux caractères suivants :

La potasse y produit un précipité blanc, qui verdit immédiatement au contact de l'air. L'ammoniaque agit de même, mais la partie restée blanche se redissout dans un excès de réactif.

L'infusion de noix de galle n'y produit pas de coloration s'ils ne renferment pas de sels ferriques. Le prussiate jaune de potasse y forme un précipité blanc bleuissant rapidement à l'air. Le ferrocyanure rouge détermine immédiatement un abondant précipité, connu sous le nom de *bleu de France*.

Les sels ferreux, en présence de corps oxydants, passent à l'état de sels ferriques. Si on y verse de l'acide azotique, il se produit d'abord une coloration d'un brun foncé qui disparaît lorsqu'on chauffe : le sel de fer est, suivant l'expression adoptée, peroxydé, et il se dégage du bioxyde d'azote.

Si l'on emploie une solution de permanganate de potasse versée avec précaution, les premières portions de réactif se décolorent en présence du sel ferreux ; mais, lorsque le fer est saturé d'oxygène, une nouvelle goutte de permanganate communique une teinte rose à la liqueur.

Cette réaction à été mise à profit pour le dosage du fer par M. Margueritte, dans l'un des procédés les plus exacts de l'analyse volumétrique.

Les sels ferriques se décomposent par le grillage, si leur acide est volatil.

Leurs dissolutions se colorent en noir par l'infusion de noix de galle. Le ferrocyanure jaune de potasse y détermine un abondant précipité de bleu de Prusse. Le ferrocyanure rouge les colore sans les troubler. Le sulfocyannre de potassium les colore en rouge sanguin.

Le sulfhydrate d'ammoniaque y produit un précipité noir de sulfure de fer; quand la liqueur est très étendue, elle se colore seulement en vert au premier instant, et le précipité n'apparaît qu'au bout d'un certain temps.

Leur coloration jaune est avivée par l'addition d'acide chlorhydrique.

La présence de substances organiques agit, dans les dissolutions de sels ferriques, comme sur les sels d'alumine, et empêche leur précipitation par la potasse et l'ammoniaque. Toutefois, le sulfhydrate d'ammoniaque produit encore, dans ce cas, sa réaction accoutumée.

Ils donnent avec la potasse ou l'ammoniaque un précipité brun foncé, insoluble dans un excès de réactif, d'hydrate de peroxyde de fer $Fe^2O^6H^6$. Cet hydrate perd déjà de l'eau vers 70°, puis donne, suivant la température, divers composés moins hydratés, dont la solubilité dans les acides diminue avec la teneur en eau, et devient même presque nulle avec le peroxyde de fer anhydre ; aussi, pour dissoudre cet oxyde, est-il nécessaire de faire digérer longtemps à chaud avec de l'acide sulfurique, ou bien encore de le maintenir préalablement pendant quelque temps avec un carbonate alcalin en fusion.

La formule du peroxyde de fer anhydre est Fe^2O^3 ; il

renferme 70 pour 100 de fer et 30 pour 100 d'oxygène.

10. Oxydes de manganèse. — Le manganèse s'exploite à l'état de sesquioxyde et de peroxyde, qui sont des poudres brunes et noires, employées dans l'industrie pour la fabrication du chlore. Ils se trouvent quelquefois associés aux oxydes de fer dans les matériaux de construction, où ils semblent jouer un rôle secondaire.

Les combinaisons du manganèse et de l'oxygène sont nombreuses. Dans les analyses, les liqueurs ne renferment en dissolution que des sels de protoxyde (MnO).

Le protoxyde de manganèse, comme celui de fer, ne peut être isolé. Il absorbe avec rapidité l'oxygène de l'air, et se transforme en oxyde rouge ou intermédiaire (Mn^3O^4).

Les sels de manganèse, d'un blanc rosâtre ou violacé, donnent, avec la potasse, un précipité blanc qui brunit promptement à l'air. L'ammoniaque produit le même effet, mais la partie restée blanche se redissout dans un excès d'ammoniaque.

Lorsque la liqueur contient en dissolution une forte proportion de sels ammoniacaux, l'ammoniaque est sans action sur les dissolutions de sels de manganèse. Il se forme un sel double d'ammoniaque et de manganèse, indécomposable par le réactif. Cependant, en présence de l'air, la liqueur absorbe peu à peu l'oxygène, se trouble, et finit par laisser déposer du sesquioxyde de manganèse.

Les carbonates de soude et de potasse produisent, dans les sels de manganèse, un précipité blanc de carbonate de manganèse. Le carbonate d'ammoniaque n'en produit pas.

Le sulfhydrate d'ammoniaque donne un précipité de sulfure de manganèse couleur rose chair.

Le manganèse se dose à l'état d'oxyde rouge ou intermédiaire Mn^3O^4. On le précipite de ses dissolutions par le carbonate de soude, sous forme de carbonate de manganèse, que la calcination transforme en oxyde rouge. Lorsque la liqueur renferme des sels ammoniacaux, il faut la faire préalablement bouillir avec le carbonate de soude en excès, jusqu'à ce que les vapeurs qui se dégagent aient perdu toute odeur ammoniacale.

Quelquefois on est conduit à précipiter le manganèse à l'état de sulfure. Cette séparation réussit même en présence d'un excès de sels ammoniacaux. Le sulfure de manganèse recueilli, bien purifié par les lavages, est redissous par un acide ; le manganèse est ensuite précipité dans la liqueur par le carbonate de soude.

L'oxyde intermédiaire de manganèse se compose de 72,05 de manganèse et 27,95 d'oxygène ; sa formule est Mn^3O^4.

11. Magnésie. — La magnésie existe en quantité considérable dans l'eau de mer. Elle forme, à l'état de carbonate, des roches qui se présentent en masses compactes, ou des bancs de carbonate double de chaux et de magnésie, nommé dolomie. La magnésie est, d'ailleurs, presque toujours associée à la chaux en proportion très variable. Elle se rencontre aussi dans un grand nombre de roches anciennes, à l'état de silicate de magnésie, isolé dans le talc et la serpentine, par exemple, ou combiné à d'autres silicates, comme dans l'amphibole blanche.

La magnésie isolée est une poudre blanche, dont la réaction est légèrement alcaline. Elle est presque absolument insoluble dans l'eau, qui en prend seulement des traces. Toutefois, si l'on mouille un papier de tournesol

rouge, et qu'on y dépose un petit tas de magnésie en poudre, le papier bleuit au contact de cette poudre.

Le sulfate de magnésie est fixe, mais les autres sels solubles de cette base se décomposent au rouge et laissent pour résidu de la magnésie.

La potasse et la soude et leurs carbonates produisent un précipité blanc dans les sels de magnésie. Ce précipité disparaît quand on ajoute à la liqueur un sel ammoniacal. Il se forme alors un sel à base ammoniaco-magnésienne indécomposable par les alcalis. Le précipité n'apparaît pas dans la liqueur si elle est, au préalable, additionnée d'un sel ammoniacal.

L'ammoniaque produit dans les sels neutres de magnésie un précipité partiel. Si la liqueur renferme à l'avance un sel ammoniacal, ou si elle a un excès d'acide avec lequel les premières gouttes d'ammoniaque puissent former un sel ammoniacal, le précipité n'apparaît pas.

Les bicarbonates alcalins ne précipitent pas les sels de magnésie.

Le sulfhydrate d'ammoniaque n'y produit pas de précipité, non plus que l'oxalate d'ammoniaque, en présence des sels ammoniacaux.

Le phosphate de soude, dans une dissolution ammoniacale d'un sel de magnésie, détermine la formation du phosphate ammoniaco-magnésien dont il a déjà été question (n° 6). Si la liqueur est étendue, il faut attendre un ou deux jours pour que la totalité de la magnésie soit précipitée. Les cristaux, adhérents aux parois du vase, forment un caractère très net pour constater la présence de la magnésie, même en très faible proportion.

La magnésie se dose habituellement à l'état de phosphate ammoniaco-magnésien. Le poids de la magnésie en est une fraction représentée par 0,3604 du précipité calciné.

Il y a dans la magnésie 6 de magnésium pour 4 d'oxygène ; la formule adoptée est MgO.

12. Chaux. — La chaux s'emploie en très grande quantité dans les constructions ; elle se trouve dans le commerce en poudre ou en morceaux. Elle provient des roches calcaires, composées de carbonate de chaux, qui forment une grande partie de l'écorce terrestre. La chaux se rencontre aussi en masses considérables à l'état de gypse ou sulfate de chaux.

La chaux pure est de couleur blanche. Elle a une saveur caustique.

Elle est sensiblement soluble dans l'eau, qui en prend environ 1/1000e de son poids. Cette dissolution, nommée eau de chaux, ramène au bleu la teinture de tournesol rougie; exposée à l'air, elle en attire l'acide carbonique et se recouvre d'une pellicule blanche de carbonate de chaux insoluble.

L'ammoniaque ne produit pas de précipité dans les sels de chaux, mais la liqueur, exposée à l'air, absorbe rapidement de l'acide carbonique et laisse déposer du carbonate de chaux. C'est une circonstance qui se produit souvent dans les analyses, et qu'il ne faut pas perdre de vue.

La potasse donne, avec les sels de chaux, un précipité blanc d'hydrate de chaux, qui se dissout en entier dans un grand excès d'eau.

Les carbonates alcalins précipitent les sels de chaux en blanc. Il en est de même des phosphates solubles.

Tous ces précipités se redissolvent facilement dans les acides.

L'acide sulfurique et les sulfates donnent aussi un précipité blanc dans les sels de chaux concentrés, même

acides. Le sulfate de chaux étant sensiblement soluble dans l'eau, le précipité n'apparaît pas dans les liqueurs très étendues. L'addition d'alcool en facilite la formation.

Le réactif caractéristique des sels de chaux est l'acide oxalique ou l'oxalate d'ammoniaque ou de potasse. Si l'on verse un de ces réactifs dans une liqueur maintenue ammoniacale, il y détermine un abondant précipité d'oxalate de chaux, corps entièrement insoluble. Ce caractère permet de reconnaître la présence de la chaux dans les liqueurs même où il n'en existe que des traces.

La chaux se sépare presque toujours à l'état d'oxalate de chaux. Pour que la précipitation soit complète, il faut laisser reposer quelque temps. Le précipité recueilli donne, par calcination au-dessous du rouge, du carbonate de chaux, et, à une température plus élevée, de la chaux anhydre désignée généralement sous le nom de chaux vive.

La composition centésimale de la chaux est de 28,58 d'oxygène pour 71,42 de calcium; sa formule chimique est CaO, et celle de son hydrate, ou chaux éteinte, CaO^2H^2.

13. Baryte. — La baryte se trouve dans la nature à l'état de carbonate et de sulfate.

Elle présente beaucoup de caractères communs avec la chaux. Elle s'en distingue par l'insolubilité absolue de son sulfate.

L'eau dissout à froid environ 1/25e de son poids de baryte caustique. L'eau de baryte est souvent employée comme réactif. Elle bleuit la teinture de tournesol.

La présence de la baryte se dénote immédiatement par le précipité que forment les sulfates, dans les liqueurs préalablement rendues acides où on la cherche. Les corps solides et inattaquables aux acides qui renferment de la

baryte doivent être portés à l'ébullition dans une dissolution de carbonate de potasse ; la masse est traitée par l'eau, et le résidu du lavage, dissous dans l'acide chlorhydrique, forme du chlorure de baryum, facile à reconnaître.

La baryte se dose ordinairement à l'état de sulfate de baryte. Le poids du précipité calciné doit être multiplié par 0,6567.

La baryte a pour formule BaO ; elle renferme 10,46 pour 100 d'oxygène et 89,54 de baryum.

14. Potasse. — La potasse existe en grande quantité à l'état de carbonate dans les cendres des végétaux. De là, son nom d'*alcali végétal.* Elle forme aussi, avec la silice, un des éléments du feldspath et de quelques autres roches primitives.

On la trouve dans le commerce à l'état d'hydrate fondu en tablettes. Elle est tellement avide d'eau qu'il est, pour ainsi dire, impossible de la préparer anhydre.

La potasse ordinaire du commerce est appelée *potasse à la chaux.* Elle se prépare par l'addition d'un lait de chaux à la lessive obtenue avec la cendre des végétaux. Le carbonate de potasse est décomposé, l'acide carbonique s'unit à la chaux pour former du carbonate de chaux insoluble, et la potasse reste dans la liqueur, d'où on l'extrait par évaporation.

Cette potasse renferme quelques sels étrangers. On en sépare la potasse pure en la faisant dissoudre dans de l'alcool concentré, où ils sont insolubles. La potasse est dite alors *à l'alcool.*

Le potasse est une base puissante, qui ramène au bleu la teinture rouge de tournesol, et se combine avec tous les acides.

Les sels de potasse sont tous solubles dans l'eau. Ils ne sont précipités par aucun réactif, lorsqu'ils sont étendus. Concentrés, ils donnent un précipité d'alun avec le sulfate d'alumine, de bitartrate de potasse avec l'acide tartrique, de perchlorate de potasse avec l'acide perchlorique, enfin, de chloroplatinate de potasse avec le bichlorure de platine.

Ce dernier composé, étant insoluble dans l'alcool, est employé pour le dosage de la potasse. On pèse le chloroplatinate lui-même, desséché, mais non calciné, et le poids de la potasse en est une portion représentée par 0,1926. Quand le précipité est peu abondant, il est préférable de le calciner; le chlorure de platine se décompose et laisse du platine métallique mêlé dans du chlorure de potassium fondu ; en traitant par l'eau, on enlève celui-ci, et on recueille le platine, que l'on dessèche et que l'on pèse. Le poids de la potasse est à celui du platine comme 0,4772 est à 1.

Le potassium est représenté par le symbole K, et la potasse ou hydrate de potassium par la formule KHO. A cet hydrate correspond l'anhydride K^2O, ou protoxyde de potassium, qui est sans emploi.

15. Soude. — La soude existe en quantités immenses dans l'eau de la mer à l'état de chlorure de sodium. Elle se rencontre à l'état insoluble dans les mêmes roches que la potasse. On la désigne sous le nom d'*alcali minéral*.

La soude possède les mêmes propriétés chimiques que la potasse.

Les sels de soude sont tous solubles, plus encore que ceux de potasse. Aucune des réactions indiquées à l'article précédent ne réussit avec les sels de soude.

On en est réduit à doser toujours la soude par différence. Après avoir recherché dans une liqueur tous les corps qu'elle peut contenir, on admet que le résidu, s'il y en a un, est formé par la soude. Aussi le dosage de cet élément manque-t-il souvent de précision.

Mais, au point de vue qualitatif, la coloration jaune que les composés sodiques communiquent à une flamme non éclairante est un caractère d'une très grande sensibilité.

Le symbole du sodium est Na ; la formule de la soude est NaHO, et celle du protoxyde, d'ailleurs sans usage, Na^2O.

16. Ammoniaque. — L'ammoniaque est un gaz très soluble dans l'eau, d'une odeur pénétrante, exerçant sur les organes de la vue et de la respiration une action énergique. On la désigne sous le nom d'*alcali volatil*. L'action chimique de l'ammoniaque et de ses sels a la plus grande analogie avec celle des deux corps précédents, que l'on appelle ensemble les *alcalis fixes*.

La dissolution de l'ammoniaque dans l'eau agit comme le gaz lui-même. Elle est constamment employée comme réactif dans les laboratoires. Elle bleuit la teinture rouge de tournesol. Lorsqu'on approche d'une dissolution qui dégage de l'ammoniaque une baguette de verre trempée dans l'acide chlorhydrique, on aperçoit des fumées blanches qui en dénotent la présence.

Tous les sels ammoniacaux sont solubles dans l'eau. Ils sont tous volatils. La plupart s'altèrent par la chaleur et se décomposent. Quand l'acide est fixe, comme dans le phosphate ou le borate, l'ammoniaque seule disparaît et l'acide reste comme résidu. Le chlorhydrate et le carbonate d'ammoniaque se subliment sans altération. Le car-

bonate d'ammoniaque a une odeur semblable à celle de l'alcali lui-même.

Le chlorure de platine agit sur eux comme sur les sels de potasse.

Les sels ammoniacaux se reconnaissent facilement. Quand on les chauffe, soit à sec, soit en dissolution, au contact d'un alcali fixe de chaux, de baryte, ou même de magnésie, il se dégage de l'ammoniaque, facile à reconnaître à son odeur et à son action sur un papier de tournesol rouge, exposé humide aux gaz ou vapeurs qui se produisent.

Mais le moyen le plus sensible pour caractériser l'ammoniaque, quand elle existe en faible quantité dans une liqueur, est de la mettre en présence d'une dissolution renfermant à la fois de la potasse et de l'iodure double de mercure et de potassium (réactif de Nessler). Il se forme une amido-iodure dont la moindre trace colore le liquide en brun foncé.

L'ammoniaque se dose quelquefois à l'état de chloroplatinate; le plus souvent on la détermine par les liqueurs titrées.

La formule du gaz ammoniacal est AzH^3.

17. Sels de plomb. — Le plomb s'emploie dans les constructions, soit à l'état naturel, soit à l'état d'oxyde (*minium*) ou de sel, notamment de carbonate (*céruse*).

Il se rencontre dans la nature, principalement sous forme de sulfure (*galène*) ou de carbonate.

Les sels solubles de plomb se reconnaissent aux caractères suivants :

Ils donnent, avec l'hydrogène sulfuré et le sulfhydrate d'ammoniaque, un précipité noir de sulfure de plomb, insoluble dans un excès de ce dernier réactif.

Avec le carbonate de soude, il se produit un précipité blanc, ainsi qu'avec les sulfates solubles et l'acide sulfurique. Enfin, avec le chromate de potasse, le précipité obtenu est jaune, et il se dissout dans une solution de potasse.

Le plomb se dose à l'état d'oxyde ou de sulfure.

18. Sels de cuivre. — Le cuivre est quelquefois employé à l'état de métal simple. Mais le plus souvent, il est utilisé en alliage avec d'autres métaux.

Il se trouve dans la nature sous forme de cuivre natif, d'oxyde et surtout de sulfure (*pyrite cuivreuse*).

Les sels cuivriques solubles présentent les caractères suivants :

En présence de l'hydrogène sulfuré et du sulfhydrate d'ammoniaque, ils donnent un précipité noir de sulfure de cuivre, insoluble dans les sulfures alcalins.

L'ammoniaque y produit un précipité verdâtre, qui se dissout dans un excès de réactif en donnant une liqueur d'un beau bleu céleste.

La potasse y produit un précipité bleu, qui noircit par l'ébullition.

Enfin, les sels de cuivre fournissent, avec le ferrocyanure de potassium, un précipité marron caractéristique. Cette réaction, d'une grande sensibilité, permet de mettre en évidence des traces extrêmement faibles de ce métal.

Le cuivre se dose sous forme de sulfure, et quelquefois de métal simple obtenu par l'électrolyse.

19. Sels de zinc. — Le zinc se trouve dans la nature sous forme de carbonate (*calamine*) et de sulfure (*blende*).

Il est employé dans les constructions, soit à l'état de

métal simple, soit à l'état d'oxyde, soit sous forme d'oxychlorure.

L'oxyde de zinc est blanc; lorsqu'il est chauffé, il prend une belle coloration jaune, qu'il perd en se refroidissant.

Les sels solubles de zinc ne donnent pas de précipité par l'hydrogène sulfuré en liqueur acide; avec le sulfhydrate d'ammoniaque, ils donnent un précipité blanc de sulfure insoluble dans un excès de réactif.

Les alcalis et les carbonates alcalins y produisent des précipités blancs, solubles dans un excès de potasse ou d'ammoniaque.

Le ferricyanure de potassium y donne un précipité jaune marron, le seul composé coloré que forment les sels de zinc avec les réactifs.

Le zinc se dose ordinairement à l'état d'oxyde et quelquefois sous forme de métal simple obtenu par l'électrolyse.

20. Oxydes d'étain. — L'étain n'est employé que dans les alliages, notamment dans le bronze.

La seule propriété qu'il soit utile de rappeler, c'est que l'acide azotique, en l'attaquant, le transforme en acide métastannique, qui, par la calcination, se réduit à l'anhydride SnO^2.

§ 2. — Procédés généraux de l'analyse chimique

L'analyse chimique a un double objet. Elle se propose à la fois de déterminer la nature des éléments qui entrent dans un produit, et de mesurer dans quelles proportions ils se trouvent combinés. Lorsqu'elle s'en tient à la première

recherche, elle prend le nom d'*analyse qualitative;* elle devient *quantitative* lorsqu'elle s'étend au second objet.

Il est rare que, dans l'étude des matériaux de construction, il y ait lieu de faire une analyse qualitative. On sait toujours à l'avance la nature des corps qu'on étudie, et quels sont les éléments qu'il importe de doser. On s'abstiendra donc de rappeler ici les procédés de l'analyse qualitative, que l'on trouverait au besoin dans les traités de chimie générale.

On commencera par exposer les précautions que demandent les diverses manipulations qu'exige une analyse quantitative. L'analyse la plus simple est toujours une opération délicate, et c'est du soin scrupuleux apporté dans ses diverses phases qu'en dépend le succès.

21. Prise d'échantillon. — La prise de l'échantillon, faite le plus souvent en dehors du laboratoire, demande beaucoup d'attention et d'intelligence. Il faut bien se rendre compte du but de l'analyse et choisir l'échantillon en conséquence.

S'agit-il, par exemple, d'étudier un banc de pierre à chaux ou de houille ? Il ne faut pas se contenter de prendre au hasard un fragment dans la partie découverte, mais pénétrer au cœur du banc, prélever des morceaux aux divers points, les mélanger ensemble intimement après les avoir divisés. L'échantillon ainsi préparé donnera un spécimen de la valeur moyenne du banc.

Veut-on se rendre compte de l'homogénéité de la couche ? Au lieu de mélanger ensemble les morceaux, il faut les envoyer séparément au laboratoire, après les avoir bien repérés et étiquetés.

S'il y a plusieurs bancs dans une même carrière, on fait le travail pour chaque banc isolément.

De même, s'il s'agit d'étudier une barre de fer ou d'acier, surtout si le métal a été fondu, il faut prendre des copeaux tant à la surface qu'au au centre, car la composition n'y est pas toujours la même.

Ces exemples font assez comprendre l'importance d'une intelligente prise d'échantillon. C'est d'elle que dépend l'utilité du travail demandé au laboratoire.

22. Préparation des échantillons. — Une fois au laboratoire, les échantillons subissent diverses préparations préliminaires destinées à faciliter leur attaque par les procédés chimiques.

Dessiccation. — Souvent ils renferment beaucoup d'humidité. On commence par les dessécher à l'étuve. A défaut d'étuve, la chaleur d'un foyer ou celle des rayons solaires peut suffire. La température de cette dessiccation préparatoire ne doit pas atteindre 100°.

Il faut avoir soin de peser l'échantillon avant et après la dessiccation, et de constater sa perte de poids.

Prise d'échantillon. — Quand les échantillons sont trop volumineux, on en prélève une partie seulement, que l'on conserve dans des bocaux bouchés. Si les produits ne sont pas homogènes, cette prise d'échantillon doit être faite avec les précautions qui ont été indiquées à l'article 21, de façon à renfermer dans les bocaux une moyenne représentant l'ensemble de ce qui a été remis.

Trituration. — Les substances ne sont facilement attaquées par les réactifs que si elles sont divisées. L'état de division à obtenir varie suivant la dureté des corps et leur plus ou moins grande résistance aux agents chimiques.

Pour des pierres tendres et faciles à attaquer, comme les calcaires, il suffit de les broyer grossièrement à coups

de marteau sur une enclume ou un corps dur quelconque; ou mieux, de se servir d'un mortier en fonte avec un pilon du même métal.

Les matières plus dures ou qui attaqueraient le fer sont pilées dans un mortier plus petit en biscuit de porcelaine, en porphyre ou en verre, avec un pilon de même nature.

Enfin, pour les substances très dures et déjà réduites à un faible volume, que l'on veut mettre en poudre très fine, on se sert de mortiers et de pilons d'agate.

Il est certains corps, analogues au verre, qui volent en éclats lorsqu'on cherche à les écraser. Il peut en résulter une perte de matière que l'on a intérêt à éviter, soit à cause de la rareté de l'échantillon, soit parce qu'on est en cours d'analyse quantitative. On peut avoir recours au mortier d'Abich (*fig.* 1). Il se compose de trois pièces d'acier distinctes. L'une *b* est un culot cylindrique portant une cavité dans laquelle s'emboîte exactement un tube *a*. Un piston *c* entre à frottement doux dans ce tube. On met le tube sur le culot, et on y introduit la matière à écraser; puis, on ajuste le piston et on frappe sur sa tête avec un marteau. Le corps se brise en petits éclats, sans qu'il y ait de projection.

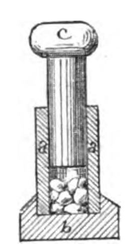


Fig. 1.

Ces petits éclats sont recueillis, et on achève de les porphyriser dans un mortier d'agate, où l'on ajoute quelques gouttes d'eau, qui suffisent pour empêcher les projections. Par surcroît de précaution, il est bon néanmoins d'opérer sur une feuille de papier blanc glacé où l'on verrait et pourrait recueillir tous les fragments qui auraient sauté.

Enfin, pour les métaux, on est obligé de recourir à la

lime, qui peut introduire dans l'échantillon un peu de fer. S'il y a inconvénient à cela, il est préférable de se procurer de petits copeaux obtenus sur un tour.

Tamisage. — La trituration produit le pluss ouvent une masse plus ou moins pulvérulente, composée de grains de diverses grosseurs. Pour séparer ceux qui seraient trop volumineux, on en fait le tamisage au moyen de passoires. Lorsqu'on a besoin d'une grande finesse, on a recours au tamis de soie.

Lévigation. — On peut aussi, dans certains cas, séparer la poudre fine par lévigation. On met la masse en suspension dans l'eau : le plus gros tombe rapidement au fond, et le plus fin surnage, en formant un trouble dans le liquide. On le recueille à part et on le laisse déposer. Ce procédé n'est applicable évidemment qu'aux corps absolument insolubles. Il faut aussi qu'ils soient bien homogènes, et que leur tendance à se précipiter soit le résultat d'une différence de volume, et non d'une différence de densité ou de composition, car alors le produit de la lévigation ne représenterait pas en moyenne le corps à étudier.

23. Pesée. — Une des opérations les plus fréquentes et les plus importantes de l'analyse chimique, c'est la pesée des corps. Elle doit être faite avec une précision extrême, qui atteint couramment le demi-milligramme.

Pour les grosses pesées, on se sert de balances ordinaires. Dans les analyses où l'on se contente d'une approximation de 1/2 centigramme, on peut employer un simple trébuchet à la main, pouvant peser 50 grammes (*fig.* 2). Dans les opérations de laboratoire, qui demandent une exactitude plus grande, on se sert habituellement de trébuchets établis sur une colonne et enfermés dans une

cage de verre, que l'on trouve couramment dans le commerce. Ces trébuchets peuvent peser 50 grammes à un demi-milligramme près. Pour des poids plus considérables que l'on veut connaître avec la même approximation, on a recours à des balances de précision.

On fait toujours les pesées par substitution. On place dans un des plateaux de la balance une *tare*, c'est-à-dire une masse quelconque à laquelle on fait équilibre sur l'autre plateau par des poids marqués, dont la somme est P. Pour avoir le poids x d'un corps quelconque, on enlève les poids P, on met le corps en question à leur place, et on achève d'établir l'équilibre au moyen d'autres poids marqués, dont on note la somme p. Il est clair que $x = P - p$, même lorsque la balance n'est pas juste.

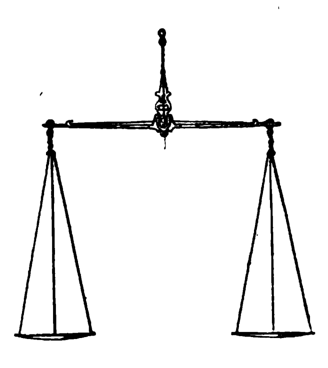


Fig. 2.

En pratique, les tares sont de petites caisses en clinquant ou des vases en verre, où l'on place de la grenaille de plomb ou des débris quelconques, de façon à faire équilibre à un poids déterminé, par exemple à une capsule donnée chargée d'un poids de 2 grammes. On a alors la *tare à 2 grammes* de la capsule. Les produits des analyses sont placés dans cette capsule pour être pesés. La somme des poids marqués qu'il faut y ajouter pour rétablir l'équilibre est le complément à 2 grammes du poids de ces produits.

Ce n'est qu'à la suite d'une série de tâtonnements que l'on parvient à l'équilibre. Pour les abréger, il importe d'employer les poids avec méthode, et non au hasard.

Cette méthode consiste à essayer d'abord le plus gros des poids dont on dispose. S'il est trop fort et fait basculer la balance, on l'enlève, et on essaie celui qui vient immédiatement au-dessous dans l'ordre des grandeurs. Si celui-ci est trop faible, on le laisse dans le plateau. S'il est trop fort, on l'enlève, et on essaie le suivant, et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'un des poids essayés donne exactement l'équilibre.

Les poids qui accompagnent un trébuchet sous cage sont les suivants :

Grammes.	Décigrammes.	Centigrammes.	Milligrammes.
1 Poids de 20 gr.	1 de 5 déc.	1 de 5 c.gr.	1 de 5 m.gr.
2 — 10	1 — 2	1 — 2	2 — 2
1 — 5	2 — 1	2 — 1	1 — 1
2 — 2			
1 — 1			

Soit, par exemple, une pesée à faire avec une tare de 5 grammes. On commencera les tâtonnements par le poids immédiatement inférieur à 5 grammes, c'est-à-dire un poids de 2 grammes. Supposons que l'ensemble des poids à ajouter soit de 3 gr. 628. On aura à essayer successivement les poids suivants, où le signe (—) indique ceux qui auront dû être enlevés comme faisant basculer la balance :

2 gr., (— 2 gr.), 1 gr., 5 déc., (— 2 déc.), 1 déc., (— 5 c. g.), 2 c.g., (— 1 c. g.), 5 m. g., 2 m. g., (— 2 m. g.), 1 m. g.

Puis, on comptera les poids qui sont restés sur le plateau, en les étalant devant soi.

24. Attaque des échantillons. — Les échantillons doivent être attaqués, c'est-à-dire mis en état de

répondre aux réactifs. L'attaque se fait soit par voie humide, soit par voie sèche, c'est-à-dire par dissolution ou par fusion.

Dissolution. — La dissolution a pour but de transformer un corps solide en une liqueur claire. Il y a deux sortes de dissolutions. On dit qu'elle est simple, quand le dissolvant et le corps dissous sont sans action chimique l'un sur l'autre, et qu'ils conservent isolément leurs propriétés. En éliminant le dissolvant, on retrouve le corps dissous à son état primitif. Telles sont la plupart des dissolutions dans l'eau, et celles des corps gras dans la benzine ou le sulfure de carbone. Il y a dissolution chimique lorsqu'il se produit une combinaison entre les deux corps mis en présence, et qu'on ne peut retrouver l'un d'eux par l'élimination de l'autre. Ainsi la chaux se dissout dans l'acide chlorhydrique, mais y passe à l'état de chlorure de calcium. Quelquefois, il y a, en outre, perte de matière. Par exemple, si, au lieu de chaux, on met du carbonate de chaux dans l'acide chlorhydrique, il se dissout, mais l'acide carbonique se dégage dans l'atmosphère.

La division mécanique des corps en accélère la dissolution. La chaleur produit généralement le même effet. Il y a toutefois des substances, comme le sulfate de chaux, qui sont moins solubles dans l'eau bouillante que dans l'eau froide.

Fusion. — L'attaque de certains corps ne peut avoir lieu qu'après leur fusion à une haute température au contact d'autres substances. Le mélange à fondre est mis dans un petit creuset de platine de 50 à 60 centimètres cubes de capacité.

On place le creuset sur un support en cuivre, posé sur la table d'un soufflet d'émailleur (*fig.* 3), portant un cha-

lumeau B qui est en communication, d'un côté avec une prise de gaz, et, de l'autre, avec le soufflet. En lançant le vent au moyen de la pédale et réglant convenablement le robinet à gaz, on porte facilement le creuset et son contenu au rouge vif.

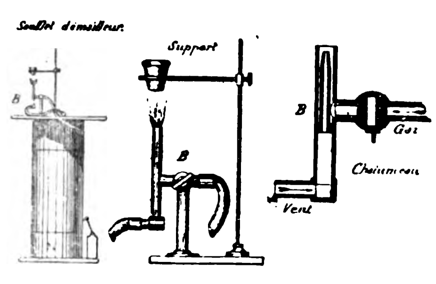


Fig. 3.

Dans certains cas, cette température est insuffisante et le creuset doit être porté au blanc ; on se sert alors avec avantage du chalumeau à gaz de M. Schlœsing (*fig.* 4). C'est un tube à bec recourbé, portant un ajutage latéral *a* par où arrive le gaz, et qui reçoit, par un tube étroit *b* placé dans son axe, de l'air issu d'un réservoir en pression. Le bec du chalumeau pénètre, par un orifice réservé à cet effet, dans la calotte d'un petit four en terre réfractaire où est placé le creuset.

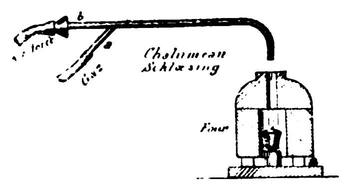


Fig. 4.

Cet appareil permet d'atteindre les températures les plus élevées et d'arriver même à la fusion du fer doux ou du platine.

Lorsqu'on ne dispose pas de gaz d'éclairage, on renferme le creuset de platine dans un creuset de terre un peu plus grand, qu'on lute et que l'on place au milieu d'un feu de forge plus ou moins violent. On peut aussi, dans ce cas, employer les lampes à essence et à alcool, dont il est inutile de donner ici la description, leur emploi devenant de plus en plus rare, depuis que les plus petites villes ont leur gazomètre.

25. Chauffages des liqueurs. — On a souvent besoin de chauffer les liqueurs contenues dans les fioles et les capsules. On les place sur une petite grille au-dessus d'un fourneau quelconque.

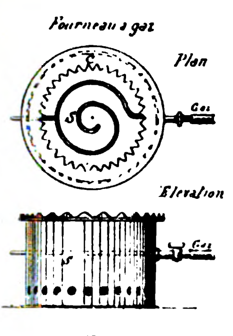


Fig. 5.

Les fourneaux à gaz, dont on peut régler la chaleur, sont préférables. Il en existe un grand nombre de modèles. Le plus commode paraît être un tambour de tôle (*fig.* 5), soutenant en son milieu un serpentin *s* horizontal en cuivre creux percé de trous, dont l'intérieur communique avec la prise de gaz.

Le fourneau porte une couronne dentelée *c* sur laquelle on place directement les gros ballons, ou une grille destinée à supporter les vases plus petits.

26. Évaporation. — L'évaporation des liquides se fait dans des capsules de porcelaine ou de platine. Il faut avoir soin de ne pas placer dans ces capsules des mélanges de nature à les attaquer. La potasse et la soude caustiques, par exemple, attaquent facilement le platine aussi bien que la porcelaine, lorsqu'elles sont concentrées. On doit alors recourir à des capsules d'argent. De même, on ne peut évaporer dans le platine des mélanges, comme l'eau régale, qui peuvent mettre du chlore en liberté, ni ceux qui dégageraient de l'acide sulfhydrique, car on formerait du chlorure ou du sulfure de platine.

La température de l'évaporation ne doit jamais être assez élevée pour que la liqueur entre en ébullition. Les bulles de vapeur d'un liquide qui bout, en venant crever à la surface, projettent toujours au loin des gouttelettes

et font perdre de la matière. En outre, dans les liqueurs concentrées, le dégagement des bulles de vapeur n'a plus lieu que par moments, et peut déterminer des soubresauts et des projections considérables et quelquefois dangereuses.

L'évaporation s'exécute très bien sur un fourneau à gaz dont on fixe la température à volonté. A défaut de gaz, on peut remplacer le serpentin par une assiette creuse où l'on a disposé sur de l'huile un certain nombre de mèches de veilleuse. On peut encore placer les capsules sur des cendres chaudes recouvrant un feu de mottes à brûler ou de charbon de Paris. Il faut toutefois éviter avec grand soin les courants d'air qui pourraient soulever les cendres et en projeter une partie dans la capsule.

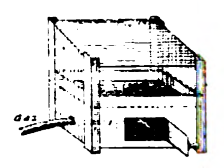


Fig. 6.

Dans les laboratoires, on se sert de bains de sable. Ce sont des caisses en tôle ou en fonte que l'on a remplies de sable siliceux fin et posées au-dessus d'un foyer de chaleur quelconque. En enfonçant la capsule plus ou moins profondément dans le sable et en la mettant plus ou moins près de la source de chaleur, on l'amène facilement au degré dont on a besoin.

Les bains de sable doivent être entourés de châssis en verre qui préservent des poussières extérieures les capsules qu'on y a placées et permettent de voir ce qui s'y passe.

La figure 6 donne la vue perspective d'un petit bain de sable pour une ou deux capsules. Le toit et les deux côtés latéraux sont garnis de plaques de verre épais. Le devant et le fond sont ouverts et permettent l'enlèvement par les courants d'air des vapeurs produites. Ce bain de sable est chauffé par un serpentin au gaz.

Les bains de sable doivent être placés sous des hottes pourvues de cheminées, dont le tirage enlève les vapeurs provenant des capsules. Il y aurait inconvénient à ce que ces vapeurs, qui le plus souvent sont acides, se répandissent dans la salle où l'on opère. Dans les laboratoires, les bains de sable ont des dimensions qui leur permettent de recevoir à la fois le nombre de capsules, quelquefois très grand, qui peuvent se trouver en même temps en expérience. Ils sont recouverts d'une trémie en bois ou en verre ayant issue dans une cheminée, et entourés de châssis mobiles en verre. Des ouvertures ménagées à la partie inférieure de ces châssis permettent à l'air de s'introduire dans la cage lorsqu'ils sont fermés, et d'enlever les vapeurs vers la cheminée. Ces bains de sable reçoivent des dispositions diverses, suivant les besoins et les locaux dont on dispose.

Leur cage forme une étuve dans laquelle on dispose des tablettes pour certaines dessiccations qui peuvent se faire au contact des vapeurs acides, par exemple celles des filtres à calciner.

Quand on a besoin de connaître exactement la température à laquelle l'évaporation a lieu, on se sert de bains-marie ou d'étuves munies de thermomètres.

27. Cristallisation. — La forme des cristaux produits par l'évaporation d'une liqueur permet souvent de reconnaître la présence des corps qu'elle tient en dissolution.

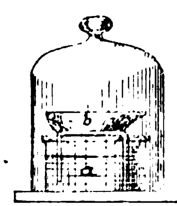


Fig. 7.

La cristallisation s'obtient par l'évaporation spontanée de quelques gouttes de la liqueur sur un verre de montre. Souvent elle ne réussit que dans une atmosphère parfai-

tement sèche. Dans ce cas, on place (*fig.* 7) le verre de montre, ou la capsule *b*, qui renferme la liqueur sous une cloche posée sur une plaque de verre rodée, au-dessus d'un vase *a* où l'on a mis de l'acide sulfurique concentré ou de la chaux vive. Ces deux corps sont très avides d'humidité et absorbent celle de l'atmosphère confinée de la cloche, à mesure qu'elle se forme aux dépens de la liqueur.

28. Précipitation. — La précipitation est le moyen le plus habituellement employé pour isoler, à l'état insoluble, chacun des éléments contenus dans une liqueur. Elle se fait ordinairement soit dans un verre sans pied à bec, nommé vase à précipiter (*fig.* 10), soit mieux, lorsqu'on doit chauffer la liqueur, dans une fiole à fond plat (*fig.* 9) qui se pose facilement sur la grille d'un fourneau et sur le bain de sable. On a une provision de fioles de diverses contenances pour tous les besoins.

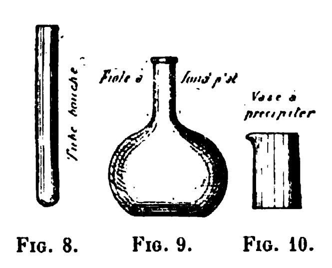


Fig. 8. Fig. 9. Fig. 10.

Lorsqu'on n'opère que sur de très petites quantités, on se contente de tubes bouchés de $0^m,015$ environ de diamètre et de $0^m,12$ à $0^m,15$ de longueur (*fig.* 8), dont le fond peut être chauffé au-dessus d'une lampe à alcool ou d'un brûleur à gaz.

Le chauffage des liqueurs qui renferment des précipités doit être fait avec précaution. Si on les porte vivement à l'ébullition, le dégagement des bulles de vapeur donne lieu soit à de la mousse, soit à des soubresauts, qui font souvent passer la matière par-dessus les bords du goulot. Ce n'est que si la rapidité est une condition de

succès que l'on chauffe les fioles à feu nu, en réglant la chaleur convenablement. Il est préférable de les porter au bain de sable, où on les laisse plusieurs heures, jusqu'à ce que tout le précipité soit bien rassemblé.

29. Filtration. — Les précipités sont séparés de leurs liqueurs soit par filtration, soit par décantation. La première méthode est la plus rapide et la plus fréquemment employée.

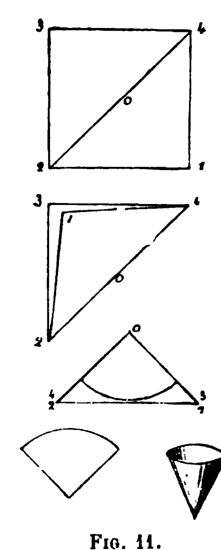


Fig. 11.

Elle consiste à retenir les précipités sur un filtre, c'est-à-dire sur une substance pourvue de pores assez grands pour laisser passer les liquides, mais non les matières solides en suspension. Le papier sans colle, dit papier à filtres, est le plus souvent employé pour cet objet.

Lorsqu'il s'agit de filtrer rapidement une grande quantité de liqueur, sans se préoccuper d'en perdre une partie, ni de recueillir le précipité bien pur, on prend des filtres à plis nombreux que tout le monde connaît et exécute facilement. Mais, dans les analyses, ils se prêtent mal aux lavages, et ne sont pas employés. On se sert de filtres simples, dont la figure 11 indique la confection. On prend une feuille de papier carrée, que l'on plie en quatre, puis que l'on découpe suivant un quart de cercle ayant pour centre le centre de la feuille de papier primitive. On ouvre le filtre en laissant d'un côté une seule épaisseur et de l'autre côté les trois autres doubles. Il présente alors la forme d'un cône creux, facile à placer sur un entonnoir.

Les filtres sont calcinés en même temps que les précipités qu'on y a recueillis ; leurs cendres restent mêlées à ces précipités et sont pesées avec eux. Le poids des cendres du filtre doit donc être retranché de la pesée. Mais, comme on ne peut connaître directement ce poids, on se contente de le supposer égal au poids des cendres d'autres filtres exactement semblables à ceux que l'on a employés.

A cet effet, après avoir taillé dans une main de papier bien homogène une provision de filtres de même grandeur, on en prend une quantité donnée, 10 ou 20 par exemple, on les incinère à part et on pèse le résidu. Le dixième ou le vingtième du poids trouvé représente la correction applicable à chaque pesée.

Pour faciliter le découpage du papier sous forme d'un quart de cercle, et pour être assuré d'avoir des filtres exactement de même grandeur, comme cela est nécessaire dans une même série d'analyses, on se sert d'un patron en tôle ou en zinc ayant la forme d'un quart de cercle de la dimension voulue. On applique le centre du patron sur l'angle correspondant au sommet du filtre, et on guide par le bord curviligne les ciseaux qui découpent le papier.

Comme on n'est jamais parfaitement assuré de l'homogénéité du papier dont on se sert, on rend aussi faible que possible l'erreur de la correction, en n'employant, sauf les cas exceptionnels, que de très petits filtres, de 5 à 7 centimètres de côté, qui ne fournissent, si le papier est bon, que quelques milligrammes de cendres.

On trouve dans le commerce deux espèces de papier à filtres, le papier ordinaire et le papier Berzélius. Le dernier est seul employé dans les analyses ; il est plus fin et donne moins de cendres que l'autre. Il a été lavé à l'acide

chlorhydrique étendu, qui a dissous la majeure partie des substances fixes qu'il renfermait, puis rincé à plusieurs reprises dans l'eau pure. Un filtre de la dimension indiquée plus haut, fait avec ce papier, ne doit donner que 3 à 4 milligrammes de cendres.

Quand il n'est pas possible de brûler le filtre, on se sert de filtres doubles tarés. On prend deux filtres semblables, que l'on place sur les deux plateaux de la balance ; s'ils ne se font pas équilibre parfait, on enlève avec les ciseaux de petits fragments du plus lourd, jusqu'à ce que l'égalité soit rétablie. Puis, on les emboîte l'un dans l'autre, et on se sert de ce filtre double comme d'un filtre ordinaire. Pour peser les matières recueillies sur un semblable filtre, on sépare le papier extérieur et on place sur le plateau de la balance où se trouve la tare. Les poids des deux filtres s'annulant, la pesée se fait comme s'ils n'existaient pas.

Les filtres en papier se placent dans des entonnoirs en verre de grandeur correspondante. Les bords de l'entonnoir doivent dépasser ceux du filtre de quelques millimètres, sans quoi le lavage en serait difficile et incomplet.

On pose les entonnoirs sur le goulot des fioles où l'on veut recueillir le liquide, ou bien sur un support quelconque, qui peut être une simple planche percée d'un trou. Il est bon, surtout lorsque l'on recueille le liquide dans des vases ouverts, de mettre la queue de l'entonnoir en contact avec les parois du vase, pour que le liquide s'écoule en filet continu et non par gouttes, dont le choc ferait jaillir des gouttelettes de liquide et pourrait les projeter au dehors.

30. Lavage. — Les précipités recueillis sur les

filtres, ainsi que les pores du papier, sont toujours chargés d'une partie de la liqueur qui a passé. Si cette liqueur renferme des substances en dissolution, il faut les en débarrasser soigneusement avant de procéder à la pesée. On y parvient par le lavage. Cette opération consiste à verser sur le filtre un dissolvant convenable, de l'eau distillée, par exemple, et à le renouveler lorsqu'il a lui-même traversé le filtre. Elle est terminée lorsqu'une goutte de l'eau de lavage ne laisse pas de résidu sur une plaque de verre où on la fait évaporer, ou bien ne trouble pas les réactifs appropriés aux substances en dissolution.

On se sert ordinairement de la fiole à laver (*fig.* 12), vulgairement appelée pissette. Elle porte un bouchon percé de deux trous où passent des tubes recourbés extérieurement. L'un des tubes, qui va jusqu'au fond et se recourbe sous un angle aigu, se termine en pointe effilée ; l'autre dépasse peu le bouchon à l'intérieur et se retourne à angle droit. Si l'on souffle par ce dernier, il se produit dans la fiole un excès de pression qui oblige le liquide à sortir par la pointe sous forme d'un filet mince et rapide. En saisissant la fiole et l'inclinant convenablement, on dirige ce filet à volonté sur les divers points du filtre. Lorsque l'on se sert d'eau chaude, il est nécessaire d'interposer entre la main et la fiole un torchon, ou mieux un anneau de liège fixé par des fils autour du goulot.

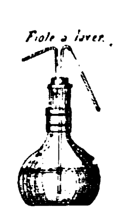


FIG. 12.

Pour laver convenablement et éviter d'avoir de volumineuses eaux de lavage, il faut attendre que toute la liqueur ait passé, puis lancer le filet de lavage, dirigé principalement sur les bords du filtre et tout autour, en petite quantité qu'on laisse passer avant de la renouveler. Cette opération doit être recommencée un

grand nombre de fois pour que le lavage soit complet.

31. Décantation. — La séparation des précipités par décantation consiste à les laisser se rassembler au fond du vase où ils ont été formés, et à décanter avec précaution la liqueur claire qui les surnage. On s'arrête aussitôt que le précipité se remet en suspension, on laisse reposer de nouveau et on recommence. Au lieu de décanter la liqueur, on peut l'enlever au moyen d'une pipette.

Pour laver le précipité, on remplace par de l'eau pure, ou tout autre liquide propre au lavage, la liqueur que l'on vient d'enlever, on agite le mélange et on le laisse reposer de nouveau. On recommence cette série d'opérations jusqu'à ce que l'eau n'entraîne plus aucune matière soluble. On recueille alors le précipité dans une capsule, et on évapore le liquide dont il est imprégné.

Cette méthode est très longue et exige l'emploi d'un volume considérable d'eau de lavage. Ces inconvénients compensent largement le petit avantage de n'avoir pas de correction à faire pour les cendres des filtres.

32. Dessiccation. — Les filtres, après le lavage, sont desséchés aussi complètement que possible, soit qu'on doive les peser avec le précipité qu'ils contiennent, soit qu'on doive les calciner. Les cendres se font mieux sur des substances sèches que sur celles qui sont humides, et un grand nombre de précipités décrépitent quand ils ne sont pas secs. On laisse d'abord égoutter complètement le filtre, et, lorsqu'il ne tombe plus de gouttes par la queue de l'entonnoir, on le porte dans un endroit chaud où il puisse se dessécher à l'air libre. Les bains de sable portent ordinairement des planches per-

cées de trous qui servent à recevoir les entonnoirs chargés de filtres. Lorsque la dessiccation est complète, on enlève le filtre avec ce qu'il contient, et on le place dans une petite capsule de platine ou de porcelaine, de 50 à 60 centimètres cubes de capacité, que l'on porte au rouge pour la calcination.

Quelquefois les précipités ne peuvent pas être calcinés. On a recours alors au procédé du filtre double (n° 29).

33. Calcination. — La calcination des filtres se fait au moyen de divers appareils que l'on nomme brûleurs, et qui développent assez de chaleur pour porter au rouge simple une capsule de platine ou de porcelaine. Les becs dits de Bunsen (*fig.* 13), où le gaz brûle avec un mélange préalable d'air atmosphérique que l'on règle à volonté, suffisent dans la plupart des cas. On place la capsule et son contenu sur un support, et le bec Bunsen par dessous. Le papier s'enflamme et se réduit peu à peu en cendres. On ne doit considérer la combustion comme complète que lorsque les cendres du papier sont parfaitement blanches, ce qui exige quelquefois un temps très long.

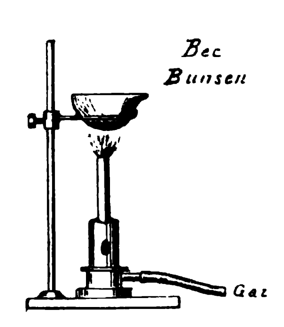


Fig. 13.

Lorsqu'on doit faire un grand nombre de calcinations, il est très commode de se servir d'un fourneau à moufle (*fig.* 14).

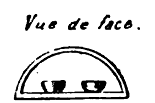




Fig. 14.

Le moufle est un demi-cylindre creux en terre réfractaire, fermé sur un de ses fonds, que l'on introduit dans un fourneau portant un orifice où il s'emboîte parfaitement. En allumant des charbons tout autour, on le porte au rouge. Les capsules que l'on y introduit peuvent être nombreuses, et s'y grillent mieux et en moins de temps que par tout autre procédé. On fait aujourd'hui des moufles qui se chauffent au moyen du gaz.

Quand il ne s'agit pas seulement de brûler le papier des filtres, mais de produire la décomposition des précipités, par exemple quand on veut amener l'oxalate de chaux à l'état de chaux caustique, la chaleur des brûleurs ne suffit pas. On place alors la matière à calciner dans un petit creuset de platine, et on opère, comme il a été expliqué pour la fusion (n° 24), au-dessus d'un chalumeau à gaz auquel un soufflet d'émailleur donne le vent.

34. Dosage par les liqueurs titrées. — On a souvent recours, dans les laboratoires, au dosage par liqueurs titrées. Il consiste à verser dans une dissolution, jusqu'à qu'il s'y produise un changement prévu d'aspect, une autre liqueur dont on mesure le volume. Ce mesurage se fait au moyen de burettes, dont il existe divers modèles. La figure 15 représente celle qu'a imaginée Hervé Mangon; elle est d'un usage commode et d'une grande exactitude. Elle se compose d'abord de la partie commune à toutes les burettes, c'est-à-dire d'un tube de verre *aa*, de 1 à 2 centimètres de diamètre, divisé en parties égales, continué à sa partie inférieure par un autre tube *dd* beaucoup plus étroit, qui se relève parallèlement et se termine par un bec *e*; puis d'un support *bb* en cuivre creux, dont la partie supérieure est mise en

communication avec la burette par un bout en caoutchouc *c*, et la partie inférieure avec une poire en caoutchouc percée d'un trou. En plaçant un doigt sur ce trou et comprimant la poire, on en chasse l'air dans la burette. Quand ensuite on ôte la main, la poire reprend sa forme et produit une aspiration momentanée bientôt arrêtée par l'air qui rentre par le trou.

Pour remplir la burette de liqueur titrée, on met celle-ci dans un verre où l'on fait plonger le bec *e* de la burette, puis on comprime un instant la poire : une partie de l'air de la burette est expulsé et sort en gouttelettes à travers la liqueur. On lâche la poire, et il se produit un vide intérieur qui amorce le bec : la liqueur s'élance dans le petit tube, et continue bientôt à descendre par siphonnement. On relève la burette quand le liquide atteint le zéro des divisions tracé en haut du plus gros tube.

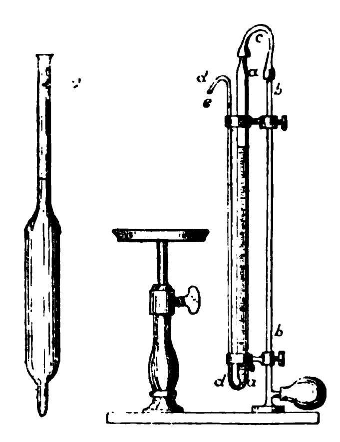


FIG. 16. FIG. 15.

Pour titrer une dissolution, on en prend un volume déterminé, au moyen d'une pipette jaugée (*fig.* 16), et on le verse dans un verre semblable au vase à précipiter (*fig.* 10), que l'on nomme alors *vase à saturation.* On le place sur un petit guéridon immédiatement au-dessous du bec de la burette, puis on agit sur la boule de caoutchouc, en bouchant le trou avec un doigt. Il se produit, dans la burette, une pression qui oblige le liquide à sortir en filet mince par le bec et à tomber dans le vase à saturation.

Aussitôt que le changement d'aspect attendu s'est produit, on lâche la poire, et, la pression n'existant plus, le liquide cesse instantanément de couler. On regarde alors à quelle division du gros tube s'arrête la surface de la liqueur titrée, et la lecture indique le volume employé pour obtenir le résultat cherché.

35. Nettoyage des ustensiles. — Les ustensiles dont on se sert dans les manipulations chimiques doivent toujours être d'une propreté absolue. Après chaque opération, ils doivent être nettoyés avec le plus grand soin. Les fioles en verre sont lavées à l'eau acidulée d'acide chlorhydrique et rincées ensuite à l'eau pure. Il est toujours prudent d'y passer un peu d'eau distillée avant de s'en servir. Les capsules de porcelaine, également lavées à l'acide, sont ensuite essuyées à fond avec un torchon. Les vases en platine se nettoient de la même manière. Si leur surface est ternie, on les récure avec un linge mouillé et saupoudré de sable fin, jusqu'à ce qu'ils aient repris leur éclat.

§ 3. — Des réactifs

Les réactifs sont des produits chimiques qui servent à constater la présence ou à produire la précipitation de certains éléments. Pour les simples recherches qualitatives, il n'est pas aussi nécessaire qu'ils soient absolument purs que pour les dosages quantitatifs. Il suffit qu'ils ne renferment pas d'éléments étrangers de nature à induire en erreur.

On trouve maintenant des réactifs convenablement

préparés chez les marchands de produits chimiques. Il est bon, toutefois, de pouvoir contrôler les fournitures que l'on s'est procurées ; les quelques renseignements qui suivent suffiront pour la plupart des cas.

36. Eau distillée. — L'eau naturelle étant impure, on ne doit se servir dans les analyses chimiques que d'eau distillée. On l'obtient en condensant les vapeurs qui proviennent de l'ébullition des eaux de rivière ou de source. L'alambic est employé pour la préparation en grand de l'eau distillée. Une cornue suffit lorsqu'on n'en veut qu'une petite quantité. Les substances en dissolution dans l'eau l'épaississent à mesure qu'elle se concentre, et, vers la fin de la vaporisation, les bulles de vapeur, en crevant, entraînent quelques gouttelettes renfermant des matières fixes. Aussi doit-on arrêter la distillation lorsqu'il reste encore au moins un cinquième du volume de l'eau mise dans l'alambic.

Les premières vapeurs sont chargées de quelques substances volatiles, notamment d'acide carbonique et d'ammoniaque, qui, le plus souvent, sont sans inconvénients. Dans les recherches où elles peuvent gêner, il ne faut se servir que de l'eau qui distille après l'évaporation des deux premiers cinquièmes.

L'eau distillée ne doit contenir ni chlorures, ni sulfates, ni carbonates, ni chaux. Elle ne doit donc se troubler ni par le nitrate acide d'argent, ni par le chlorure acide de baryum, ni par l'eau de chaux, ni par l'oxalate d'ammoniaque avec excès d'ammoniaque.

L'eau de pluie recueillie en plein air et celle de certaines sources des terrains primitifs peuvent souvent remplacer l'eau distillée pour les analyses courantes.

37. Acide chlorhydrique. — L'acide chlorhydrique ordinaire du commerce est coloré en jaune. Il contient des traces de perchlorure de fer, et est mélangé d'un peu de gaz chloreux, d'acide sulfurique et d'acide sulfureux. C'est en le distillant qu'on obtient l'acide pur des laboratoires, qui est incolore.

38. Acide azotique. — Il est quelquefois coloré en jaune par des traces d'acide hypoazotique ; on s'en débarrasse au besoin par l'ébullition. Il pourrait contenir un peu de chlore et d'acide sulfurique, dont on reconnaîtrait facilement la présence au moyen du nitrate d'argent et du chlorure de baryum.

39. Acide sulfurique. — L'acide du commerce renferme un peu de sulfate de plomb et quelquefois du sulfate de fer.

Il peut aussi s'y trouver de l'acide sulfureux et de l'acide hypoazotique, qui disparaissent par l'ébullition. L'acide pur ne doit pas donner de résidu lorsqu'on l'évapore à sec, ni de précipité noir lorsqu'on le sursature d'ammoniaque et qu'on y ajoute du sulfhydrate d'ammoniaque.

L'acide sulfurique n'est guère employé comme réactif à l'état concentré ; on l'étend dans quatre ou cinq fois son volume d'eau. Ce mélange est dangereux à préparer par suite de la forte chaleur qu'il développe. Il ne faut pas le faire dans des fioles en verre, qui pourraient casser, mais dans des terrines de grès. L'eau doit être mise d'abord, et l'acide sulfurique versé par de petites portions successives dans le mélange, brassé vivement à chaque fois. Il ne faut jamais verser de l'eau sur de l'acide sulfurique concentré : il se produirait une chaleur assez forte pour vaporiser une partie de l'eau et projeter le liquide.

40. Acide sulfhydrique. — Ce réactif s'altère facilement, même dans des flacons bien bouchés. Pour les analyses, on doit le préparer chaque fois qu'on en a besoin. On se sert de préférence de sulfure de calcium, que l'on produit en chauffant au rouge, dans un creuset, un mélange d'une partie de charbon pilé avec six parties de plâtre en poudre.

Le produit est introduit avec de l'eau dans un flacon A (*fig.* 17) dont le bouchon est traversé par un tube à entonnoir et par un tube de dégagement. On verse par l'entonnoir de l'acide chlorhydrique, et l'acide sulfhydrique se dégage. On le fait passer dans un flacon laveur *a*, puis on le reçoit dans un flacon *b*, où l'on a placé soit la liqueur que l'on veut traiter directement par ce réactif, soit l'eau distillée fraîchement bouillie, où l'on veut le recueillir en dissolution.

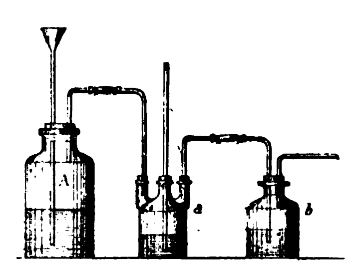


Fig. 17.

Après avoir traversé le flacon laveur, le gaz est suffisamment pur pour les réactions qu'on lui demande.

41. Sulfhydrate d'ammoniaque. — Il s'obtient en plaçant de l'ammoniaque dans le vase *b* de l'appareil ci-dessus. Il est incolore, mais bientôt il se colore en jaune d'or; il renferme alors un excès de soufre en dissolution. Il peut servir en cet état dans la plupart des cas, mais les liqueurs acides y produisent un dépôt blanc de soufre, qu'il ne faut pas confondre avec d'autres précipités.

42. Ammoniaque. — L'ammoniaque du commerce renferme souvent du carbonate d'ammoniaque. Elle précipite alors l'eau de chaux par l'ébullition.

Quand elle est impure, elle peut contenir, en outre, un peu de plomb, que l'on reconnaît en la traitant par l'acide sulfhydrique, un peu de chlore ou d'acide sulfurique, que l'on constate, après l'avoir sursaturée par un léger excès d'acide azotique, au moyen de nitrate d'argent ou de chlorure de baryum.

Si l'ammoniaque renferme seulement du carbonate, il est facile de la purifier. On se sert de l'appareil indiqué au n° 40, où l'on remplace le flacon A par un ballon ou une fiole que l'on puisse chauffer. On y place l'ammoniaque avec un peu de chlorure de calcium, et on chauffe Le liquide bout vers 45°; l'acide carbonique reste uni à la chaux, et l'ammoniaque pure qui se dégage est recueillie dans le vase *b*.

Carbonate d'ammoniaque. — Celui que l'on trouve sous forme de gâteaux d'un beau blanc obtenus par sublimation est généralement pur. Il renferme parfois un peu de chlorhydrate qu'il est facile de constater dans les cas rares où cela aurait quelque inconvénient.

Oxalate d'ammoniaque. — Ce sel peut renfermer des traces de sulfate ou de chlorhydrate d'ammoniaque, qui sont sans inconvénients pour le dosage de la chaux, et qu'il serait, du reste, facile de reconnaître. On remplace quelquefois ce réactif par du sel d'oseille, ou bioxalate de potasse, qui doit être neutralisé par un excès d'ammoniaque.

43. Potasse et soude. — La dissolution de potasse ou de soude employée comme réactif se prépare au moyen de 1 partie d'alcali à l'alcool et de 5 parties

d'eau environ. Il est rare qu'elle ne contienne pas une certaine quantité de carbonate, par suite du contact à l'air de l'alcali en morceaux ou de la dissolution elle-même. Dans les cas où la présence de ce carbonate peut être nuisible, il faut, avant de se servir de la dissolution, la faire bouillir avec un peu de chaux vive éteinte en poudre, laisser reposer et décanter la liqueur claire.

On recherche, comme à l'ordinaire, la présence de l'acide sulfurique ou du chlore dans les alcalis, dans les cas où ces corps pourraient gêner, même en petite quantité.

Les alcalis renferment souvent un peu de silice, enlevée aux vases où on les a préparés; on en reconnaît la présence en saturant la dissolution par de l'acide azotique, évaporant à sec et reprenant par l'eau distillée. Le résidu, s'il y en a, est de la silice. Une potasse qui en contient une proportion notable est un mauvais réactif. La soude en est plus souvent exempte.

Carbonates de potasse et de soude. — Ces deux produits sont généralement assez purs. Ils sont sujets aux mêmes impuretés que les alcalis eux-mêmes. On les recherche de la même manière.

44. Phosphate de soude. — Ce sel cristallise facilement. Il est donc le plus souvent pur. S'il en était besoin, on vérifierait s'il renferme de l'acide sulfurique ou du chlore.

Il pourrait se trouver mêlé d'un peu de phosphate de chaux. On le reconnaîtrait en faisant chauffer sa dissolution avec de l'ammoniaque.

45. Chlorure de baryum. — Ce sel cristallise aussi très facilement, ce qui est une garantie de sa

pureté habituelle. Quand on a séparé la baryte de la dissolution par un excès d'acide sulfurique, la liqueur filtrée doit s'évaporer sans résidu.

Lorsqu'on ne veut pas introduire du chlore dans les liqueurs, on remplace le chlorure de baryum par le nitrate ou l'acétate de baryte, ou simplement par l'eau de baryte.

Eau de baryte. — Elle s'obtient en faisant bouillir dans l'eau distillée de la baryte caustique broyée, et décantant la liqueur. Elle ne doit pas se troubler, quand on la sursature par l'acide azotique, et qu'on y verse du nitrate d'argent. La baryte caustique, vendue comme pure, renferme quelquefois un peu de nitrate de baryte, qui peut avoir des inconvénients dans certains cas. On en reconnaît la présence par un des moyens indiqués au n° 5.

46. Nitrate d'argent. — Traitée par un excès d'acide chlorhydrique et filtrée, la dissolution du nitrate d'argent ne doit pas laisser de résidu à l'évaporation, ni se colorer par l'acide sulfhydrique ou le sulfhydrate d'ammoniaque, ce qui indiquerait la présence du plomb ou du cuivre.

Sulfate d'argent. — Ce sel est soluble dans environ cent fois son poids d'eau. Cette dissolution doit présenter les mêmes caractères que celle de l'azotate d'argent. En outre, elle ne doit pas contenir de nitrate, ce dont on s'assure par les procédés indiqués au n° 5.

47. Acides tartrique et citrique. — Ces acides contiennent presque toujours un peu de fer qui altère certains dosages. On reconnaît la présence du fer en

sursaturant l'acide avec de l'ammoniaque et ajoutant du sulfhydrate d'ammoniaque.

Il ne sera pas donné de plus amples renseignements sur les réactifs en usage. On trouverait les indications plus détaillées dont on aurait besoin dans les traités de chimie. Il est toujours facile de prévoir la nature des impuretés à craindre dans un produit, en se reportant aux procédés de sa fabrication industrielle.

CHAPITRE II

MATÉRIAUX DE MAÇONNERIE

Les maçonneries sont constituées par des pierres naturelles ou artificielles, reliées entre elles par du mortier ou par du plâtre.

Le mortier est composé de sable et de chaux ou de ciment.

La nature chimique des pierres naturelles et des sables n'a pas grande influence sur la solidité des constructions. Ce sont surtout leurs caractères physiques qui doivent être étudiés. Il n'en sera donc pas question ici, et, au besoin, les procédés d'analyse indiqués pour les autres matériaux pourraient leur être appliqués par assimilation, suivant leur nature.

Il n'en est pas de même des matériaux artificiels, parmi lesquels se rangent les chaux, ciments et plâtres obtenus par la cuisson de pierres naturelles. Il est donc nécessaire de donner d'abord quelques renseignements sur leur composition.

§ 1er. — Composition chimique des chaux et ciments

48. Définition et nomenclature. — On appelle chaux, en industrie, le produit de la calcination des pierres calcaires.

Les pierres calcaires sont celles qui se composent essentiellement de carbonate de chaux. On les reconnaît à leur propriété de faire effervescence avec les acides et aux caractères des sels de chaux obtenus par cette attaque (n° 12).

Les pierres calcaires sont rarement pures. Le plus souvent elles renferment, outre le carbonate de chaux, des substances étrangères, dont quelques-unes ont une influence capitale sur les propriétés de la chaux.

On distingue quatre classes générales de chaux, savoir :

Les chaux grasses;

Les chaux maigres;

Les chaux hydrauliques;

Les ciments.

On indiquera d'abord les propriétés de chacune de ces classes de produits.

49. Chaux grasses. — Les chaux devant être broyées avec de l'eau pour leur emploi dans les maçonneries, l'essai le plus naturel à leur faire subir consiste à voir comment elles se comportent au contact de l'eau.

On prend, à cet effet, un ou plusieurs morceaux de chaux ; on les immerge pendant une minute environ dans l'eau, jusqu'à ce qu'ils soient complètement imbibés, puis on les place dans un vase peu sujet à se briser par les hautes températures.

Lorsqu'on essaie des chaux grasses, on voit presque aussitôt les morceaux se gonfler, puis se fissurer dans diverses directions. Bientôt ils décrépitent en sifflant et dégagent d'abondantes fumées caustiques et brûlantes. La température de la chaux augmente progressivement; on ne peut bientôt plus la supporter avec la main, et vers la fin, elle s'élève assez pour briser les vases en verre ou

même en porcelaine dont on se serait servi : elle peut atteindre jusqu'à 300°. Enfin, la masse tombe en poussière et se refroidit peu à peu.

Au sortir du four, la chaux était *vive*. Réduite en poussière à la suite de son contact avec l'eau, elle est dite *éteinte*. Dans ce nouvel état, c'est un produit chimique nouveau, un composé de chaux et d'eau, un hydrate de chaux.

Les chaux sont incorporées dans les mortiers à l'état de pâte ferme. C'est donc sous cette forme qu'il convient surtout de les étudier. A cet effet, on verse de l'eau peu à peu dans le vase où l'on a placé les morceaux de chaux, et on remue en même temps la matière avec une spatule, puis avec un pilon, jusqu'à ce qu'elle soit amenée à l'état de forte consistance argileuse. On la laisse digérer quelques heures, afin de donner aux grains qui ne seraient pas suffisamment hydratés le temps de s'éteindre.

La pâte ainsi obtenue avec les chaux grasses est ductile et onctueuse au toucher; de là vient le nom donné à la matière qui l'a formée.

Cette pâte, abandonnée à l'air libre, se dessèche peu à peu, se fendille et durcit.

Le durcissement est dû à la dessiccation. Toutefois, l'acide carbonique de l'air transforme peu à peu la surface en carbonate de chaux, et pénètre lentement dans la masse, qui se consolide encore ainsi à la longue.

La chaux grasse immergée sous l'eau ne durcit pas, quelle que soit la durée de son séjour, sauf par l'action très lente de l'acide carbonique dissous dans l'eau.

Lorsque l'on éteint la chaux grasse, elle fournit un volume de chaux éteinte, soit en poudre, soit en pâte, plus considérable que son volume propre. Cette propriété est désignée sous le nom de *foisonnement*.

Le foisonnement est d'autant plus grand que la chaux est plus grasse.

58. Chaux maigres. — On a, pendant longtemps, donné le nom de chaux maigres à toutes celles qui ne donnaient avec l'eau qu'une pâte peu liante. Elles différaient des chaux grasses principalement par le faible volume d'eau qu'on pouvait leur faire absorber.

Aujourd'hui, on distingue les chaux hydrauliques des chaux maigres proprement dites. On réserve ce dernier nom pour celles qui ne sont pas grasses et ne font pas prise sous l'eau.

Les chaux maigres présentent beaucoup de caractères communs avec les chaux grasses ; mais ces caractères sont généralement moins énergiques.

Ces chaux ne sont guère utilisées dans les constructions, bien qu'elles se prêtent aux mêmes applicatious que les chaux grasses. Par suite de leur faible foisonnement, il en faut une quantité plus considérable pour fabriquer un volume donné de mortier; et, comme elles reviennent, en général au même prix, elles sont d'un emploi plus coûteux, ce qui les fait écarter.

51. Chaux hydrauliques. — Les chaux hydrauliques sont des chaux dont la pâte durcit par elle même, à sec ou sous l'eau.

Lorsqu'on les abandonne à l'air après immersion, elles se comportent comme les chaux maigres. Elles tardent des minutes, des quarts d'heure, des heures entières, à changer d'état. A la fin, cependant, elles commencent à fumer et à se fendiller, en décrépitant peu ou point.

Les phénomènes qui accompagnent l'extinction se manifestent tous, mais avec moins d'énergie que dans les

chaux grasses. La vapeur est moins abondante, moins chaude et moins caustique. Le foisonnement est moins prononcé et quelquefois n'est pas sensible.

Les chaux hydrauliques forment une série continue, sans lacunes. L'intensité avec laquelle se manifeste l'extinction est donc variable avec les divers échantillons. Très marquée dans ceux qui se rapprochent des chaux grasses, elle diminue à mesure que l'hydraulicité se prononce davantage, et elle disparaît tout à fait avec les produits de certains calcaires qui constituent alors la classe des ciments.

La chaux hydraulique se réduit, comme la chaux grasse, en pâte ferme, de consistance argileuse, mais moins onctueuse et moins douce au toucher.

Abandonnée à l'air libre, la pâte de chaux hydraulique se comporte comme celle de chaux maigre. Elle se dessèche et durcit; elle absorbe aussi l'acide carbonique de l'air, qui la pénètre de la surface au centre, mais avec une extrême lenteur.

Elle éprouve en même temps un retrait, mais moins considérable que celui de la chaux grasse. Elle se fendille moins en se desséchant.

Au contact de l'humidité, la pâte de chaux hydraulique se comporte tout autrement que celle de chaux grasse.

Lorsqu'on la laisse exposée dans une enceinte parfaitement humide et où la dessiccation est impossible, elle durcit cependant au bout d'un temps plus ou moins long; il en est de même sous l'eau.

Ainsi, la chaux hydraulique en pâte durcit au contact de l'eau et ne s'y dissout pas. Elle permet donc d'établir des constructions sous l'eau de la même manière que dans l'atmosphère.

La durée du temps nécessaire pour que les chaux hydrau-

liques durcissent sous l'eau est variable. Il y en a qui font prise en quelques jours, d'autres qui demandent plus d'un mois. Il en résulte des qualités diverses, qui font rechercher telle ou telle espèce de préférence dans un cas donné.

Vicat a donné à ces chaux des noms qui rappellent la plus ou moins grande rapidité de leur durcissement. Pour lui, le type des chaux hydrauliques proprement dites fait prise au bout de six à huit jours.

Celles dont la prise est plus rapide sont dites éminemment hydrauliques ; celles dont la prise est moins rapide sont moyennement ou faiblement hydrauliques.

La prise des chaux n'a pas lieu d'une façon brusque; les pâtes passent progressivement de l'état mou à leur maximum de dureté. Il fallait donc une définition pour fixer le moment où elles doivent être considérées comme prises. Vicat a donné cette définition dans les termes suivants :

« Nous disons que la chaux a fait prise, quand elle porte sans dépression une aiguille à tricoter de $0^{cm},12$ de diamètre, limée carrément à son extrémité et chargée d'un poids de 0 kil. 30.

« Dans cet état, la matière supporte facilement la pression du pouce, poussé avec la force moyenne du bras. Elle ne peut changer de forme sans se briser. »

La durée de la prise a servi à classer les chaux. Bien que les expériences faites à ce sujet soient peu précises et les résultats souvent contradictoires, suivant la valeur attribuée par les auteurs aux expressions en usage, on peut néanmoins les résumer comme il suit :

Les chaux éminemment hydrauliques font prise généralement du deuxième au quatrième jour, lorsqu'elles sont maniées à la sortie du four;

Les chaux hydrauliques proprement dites, du cinquième au neuvième jour ;

Les chaux moyennement hydrauliques, du dixième au quinzième jour ;

Les chaux faiblement hydrauliques, du seizième au trentième jour.

Lorsqu'elles demandent plus d'un mois pour durcir, elles sont considérées comme grasses ou maigres.

On verra plus loin un autre mode de classification plus précis, basé sur l'analyse chimique.

52. Ciments. — Les ciments sont des chaux qui ne s'échauffent pas ou s'échauffent à peine au contact de l'eau ; et qui, mises en morceaux dans l'eau, ne s'éteignent pas et ne se réduisent pas en poudre.

Lorsqu'on veut les avoir en poudre, il faut les broyer mécaniquement comme des pierres.

Les ciments se comportent dans l'eau à la façon des chaux hydrauliques. Réduits en pâte ferme et immergés, ils font prise sous l'eau, mais beaucoup plus promptement que les chaux.

On distingue deux grandes classes de ciments : les ciments *à prise rapide*, ou ciments *romains;* et les ciments *à prise lente*, ou ciments *de Portland.*

Les ciments romains ont été connus les premiers ; ils doivent leur nom au préjugé, fort répandu alors, que les anciens employaient dans leurs constructions des mortiers spéciaux et d'une grande solidité. Ils font prise pour ainsi dire instantanément, lorsqu'ils sont gâchés au sortir du four. Un peu éventés, ils font prise en un quart d'heure au plus.

Les ciments de Portland sont ainsi nommés parce que les premiers de cette espèce, fabriqués en Angleterre,

donnaient des enduits semblables par la couleur et l'aspect à la pierre de taille de Portland. Ils sont moins actifs que les précédents. A l'état frais, ils se solidifient en un quart d'heure. Fabriqués et exposés à l'air depuis quelques mois, ils ne font prise qu'après plusieurs heures et même une demi-journée.

Les pâtes de ciment, placées sous l'eau, atteignent promptement une grande dureté. Leur résistance à la rupture est supérieure à celle des chaux.

53. Chaux limites. — On rencontre encore une autre classe de chaux, qui a reçu de Vicat le nom de *chaux limites*.

Ces chaux présentent le caractère singulier de faire prise sous l'eau à la manière des ciments ; puis, au bout de peu de temps, elles se boursouflent, se ramollissent et se réduisent en bouillie comme des chaux grasses.

On comprend combien leur emploi serait dangereux dans les constructions sous l'eau, et avec quel soin elles doivent en être bannies.

Les calcaires qui les produisent sont néanmoins de même nature que les pâtes qui servent à fabriquer les ciments de Portland. La différence de qualité entre les deux produits provient surtout du degré de cuisson. Ce sont des chaux limites lorsqu'ils ont été cuits à la façon des chaux hydrauliques ordinaires ; ils deviennent ciments à prise lente lorsqu'ils ont été brûlés, suivant l'expression de Vicat, c'est-à-dire cuits jusqu'à commencement de fusion.

54. Relation entre la qualité des chaux et leur composition chimique. — On a vu que les chaux

grasses se dissolvent en entier dans l'eau renouvelée, que les chaux maigres se dissolvent en laissant un résidu inconsistant, et que les chaux hydrauliques n'abandonnent presque rien à l'eau. Il était donc naturel de chercher une relation entre le degré d'hydraulicité et la nature des éléments étrangers unis à la chaux.

L'ingénieur anglais John Smeaton paraît être le premier qui se soit préoccupé de cette relation. Il a fait la remarque, en 1756, que la plupart des calcaires fournissant des chaux susceptibles de durcir sous l'eau renfermaient de l'argile ; mais il ne poussa pas plus loin cette observation et n'en tira aucune conséquence pratique.

Au commencement du siècle présent, divers savants portèrent leur attention sur la question. Bergmann et Guyton attribuèrent à la présence de quelques centièmes de manganèse l'hydraulicité des pâtes. Th. de Saussure renouvela l'idée de Smeaton, et affirma que cette propriété était due à la présence de la silice et de l'alumine combinées en certaines proportions. Descotils, en 1814, conclut de l'analyse du calcaire de Senonches que la condition essentielle de l'hydraulicité était une grande quantité de silice disséminée dans la pierre.

La question en était là, lorsque Vicat la reprit de toutes pièces, en essayant de former par synthèse des chaux hydrauliques avec toutes les substances qui avaient été indiquées.

« L'observation de Saussure, dit-il en 1818, nous a conduit à faire l'essai de substances principalement composées de silice et d'alumine. Nous avons réussi à les combiner avec la chaux par un moyen différent de celui qu'indique Guyton ; le succès a surpassé nos espérances. L'opération que nous allons décrire est une véritable synthèse qui réunit d'une manière intime, par l'action du

feu, les principes partiels que l'analyse sépare dans les chaux hydrauliques. Elle consiste à laisser réduire spontanément[1] en poudre, dans un endroit sec et couvert, la chaux que l'on veut modifier, à la pétrir ensuite à l'aide d'un peu d'eau, avec une certaine quantité d'argile grise ou brune, ou simplement avec de la terre à briques, et à tirer de cette pâte des boules qu'on laisse sécher, pour les faire cuire ensuite au degré convenable.

« On conçoit déjà qu'étant maître des proportions, on l'est également de donner à la chaux factice le degré d'énergie qu'on désire, et d'égaler ou de surpasser à volonté les meilleures chaux naturelles. »

Ces quelques lignes résument la grande découverte de Vicat.

Il était, dès lors, établi que les propriétés des chaux résultaient de leur composition chimique, puisqu'on pouvait à volonté les régler en modifiant cette composition.

55. Éléments étrangers trouvés dans les calcaires. — Les matières étrangères qui se rencontrent dans les calcaires, en dehors de l'acide carbonique et de la chaux, sont essentiellement :

La silice ;

L'alumine ;

L'oxyde de fer ;

La magnésie ;

Et subsidiairement :

De l'acide sulfurique ;

De l'acide phosphorique ;

[1] « L'extinction spontanée n'est pas indispensable, mais c'est le mode de réduction le plus économique. » (Note de Vicat.) Il faut faire abstraction de cette supériorité attribuée à tort, par Vicat, au procédé de l'extinction spontanée au début de ses recherches. On a dû faire la citation textuelle.

Des matières bitumineuses ou charbonneuses ;

Des substances organiques et de l'eau.

En outre, les chaux obtenues par la cuisson des calcaires contiennent souvent une partie des cendres du combustible employé.

On va étudier successivement l'influence de ces diverses substances sur la qualité des chaux.

56. Matières combustibles et volatiles. — Les substances volatiles, eau, matières organiques ou bitumineuses, sont sans influence, car elles disparaissent pendant la cuisson et ne se retrouvent pas dans la chaux. Il n'y a donc pas à s'en occuper.

Toutefois, les chaux renferment presque toujours un peu d'acide carbonique qui a échappé à la calcination, ou qui a été absorbé par une longue exposition à l'air libre, et un peu d'humidité empruntée à la même source. La présence de l'acide carbonique, quand la dose est notable, fait perdre à la chaux une partie de l'énergie de ses propriétés.

57. Silice. — C'est la silice qui a la plus grande influence sur l'hydraulicité des chaux. Tous les calcaires à chaux hydraulique renferment de la silice. Cette silice s'y trouve à l'état de combinaison chimique, soit avec la chaux, soit avec les autres bases que renferme le produit. Cet état est mis en évidence quand on attaque la chaux par un acide fort ; la silice se précipite alors à l'état gélatineux. Les chaux hydrauliques les plus anciennement connues et les plus renommées sont des chaux siliceuses. Ainsi, la chaux du Teil renferme normalement de 23 à 24 0/0 de son poids en silice ; celle de Senonches, de 16 à 17 0/0.

Dans les calcaires où la silice est à l'état d'argile, ou bien sous forme de poudre impalpable disséminée dans la masse, la cuisson en opère la transformation en silice chimiquement attaquable, et c'est ainsi que le produit devient hydraulique.

Lorsque le sable siliceux est sous forme de grains de grosseur appréciable, il reste rebelle à la cuisson et n'entre pas en combinaison chimique avec la chaux. Il amaigrit alors les chaux, loin de leur communiquer des propriétés hydrauliques.

58. Alumine. — Le rôle de l'alumine n'est pas aussi net. Il est certain que sa présence n'est pas nécessaire pour constituer des chaux hydrauliques, puisqu'il y en a, comme celles du Teil, qui en sont presque entièrement dépourvues.

Néanmoins, cet élément est loin de pouvoir être considéré comme inerte. En présence de la silice, probablement par son affinité chimique pour cet acide, il exalte les caractères hydrauliques des chaux, et leur degré d'énergie croît dans la proportion, non seulement de silice, mais d'argile ou silicate d'alumine qu'elles renferment.

Il faut toutefois que la proportion de l'alumine par rapport à la silice soit maintenue dans de certaines limites. Lorsque cette limite est dépassée, une partie seulement de l'alumine est efficace ; le reste se comporte comme une matière inerte n'ayant pour effet que d'amaigrir la chaux. Vicat fixe cette limite aux proportions de l'argile normale, ou bisilicate d'alumine, ayant 36 d'alumine pour 64 de silice.

Il est fort rare que cette limite soit atteinte dans la nature. Aussi, le plus souvent, on ne considère pas sépa-

rément la dose de chacun de ces éléments, mais simplement celle de leur somme, que l'on confond sous la dénomination générale d'argile.

59. Oxydes de fer et de manganèse. — La présence de ces oxydes semble sans influence sur la qualité des chaux. Mais ils paraissent utiles dans la cuisson des ciments, pour faciliter la formation des silicates multiples auxquels on attribue la qualité de ces produits.

60. Magnésie. — L'action de la magnésie n'est pas jusqu'à ce jour parfaitement définie. Vicat lui a successivement attribué une influence nulle et une influence marquée sur l'hydraulicité des chaux où elle se trouve en quantité notable. Mais il ne semble pas qu'on ait réussi à obtenir industriellement des chaux hydrauliques avec des calcaires magnésiens dépourvus, d'ailleurs, des éléments hydraulisants par excellence, la silice et l'alumine.

Mais la magnésie, lorsqu'elle existe en notable proportion dans des produits fortement calcinés, comme les ciments, joue un rôle important, qui a été la source de graves accidents dans les constructions. Elle ne paraît pas se combiner, comme la chaux, avec la silice et l'alumine des calcaires, et reste à l'état de magnésie libre calcinée, intimement mélangée avec le ciment. Par suite de son affinité avec l'eau, elle s'hydrate postérieurement à l'emploi dans les mortiers où elle est incorporée, avec plus ou moins de rapidité, suivant l'humidité de l'atmosphère où se trouve la construction. Cette hydratation donne lieu à un gonflement considérable, qui exerce une pression irrésistible contre les matériaux joints par le mortier et

provoque la désagrégation et le renversement des maçonneries.

61. Soufre et acide sulfurique. — Certains calcaires renferment de l'acide sulfurique, sous forme de sulfate de chaux, ou des sulfures, par exemple des pyrites de fer. Pendant la calcination, les gaz de la combustion produisent une action différente suivant leur composition. Les sulfures peuvent être grillés et se transformer en sulfates lorsque la flamme est oxydante ; ou inversement, si elle est réductrice, les sulfates peuvent passer à l'état de sulfures.

La présence du sulfate de chaux est considérée comme fâcheuse dans les produits hydrauliques, d'une part à cause de sa solubilité dans l'eau, d'autre part parce que, s'il est fortement calciné, il s'hydrate lentement à la façon de la magnésie et produit des effets analogues.

Quant aux sulfures, on n'est pas bien fixé sur leur action, mais il est probable qu'ils ne subsistent pas longtemps et se transforment bientôt en sulfates.

62. Acide phosphorique. — On trouve des traces d'acide phosphorique dans la plupart des calcaires, et certains ciments de Portland en renferment près de 1/1000 de leur poids. On n'a pas encore étudié l'influence que l'acide phosphorique peut avoir sur la prise des chaux. Si la dose en est un peu considérable, il est probable qu'il n'a d'autre effet que de neutraliser et rendre inerte un poids de chaux un peu supérieur au sien.

Il est rare, du reste, que les calcaires aient de l'acide phosphorique en proportion notable, et, dans ce cas, ils

sont employés surtout en agriculture et non à la confection des chaux pour les constructions.

63. Alcalis. — On trouve dans un grand nombre de chaux, et surtout dans les ciments, une petite dose d'alcali fixe, potasse ou soude, qui provient soit de l'argile de la matière première, soit des cendres du combustible. Ces alcalis paraissent avoir une influence au moins indirecte sur la qualité des chaux. Lorsqu'on fait cuire un calcaire argileux au contact des substances alcalines, celles-ci attaquent les silicates et en facilitent la fusion. Avec un même degré de chaleur, on doit donc obtenir, par les alcalis, une silice plus fortement combinée et des réactions chimiques plus énergiques. Cette influence se fait sentir principalement dans la fabrication des ciments, dont la qualité dépend, en grande partie, de la cuisson et du degré de fusibilité des silicates obtenus.

64. Résumé. — En résumé, la substance hydraulisante par excellence est la silice amenée à l'état de combinaison chimique attaquable aux réactifs. L'alumine, sans exercer la même action, facilite l'influence de la silice, et doit être rangée parmi les substances qui exaltent l'hydraulicité des produits. Les autres corps étrangers sont inertes et ne produisent qu'un amaigrissement de la chaux. La magnésie seule paraît pouvoir se substituer à l'alumine, ou même agir toute seule dans des circonstances déterminées. Mais dès qu'elle intervient en forte proportion, elle est inerte et peut même devenir dangereuse pour la qualité des chaux.

On admet donc que l'hydraulicité des chaux est due à la silice combinée et à l'alumine qu'elles renferment.

La silice et l'alumine étant les éléments essentiels de

l'argile et se trouvant, en effet, souvent combinées ensemble à l'état d'argile dans les calcaires, on désigne souvent leur réunion sous le nom plus court d'*argile*. Il est bon de se rappeler que l'usage de cette expression ne préjuge pas l'état chimique où la silice et l'alumine peuvent se rencontrer.

65. Indices d'hydraulicité. — On a vu que l'on classe les chaux d'après le temps qu'elles emploient à faire prise, lorsqu'elles sont mises en pâte et immergées immédiatement après la sortie du four. La nomenclature adoptée par Vicat, et conservée jusqu'ici sans modification, comprend :

Les chaux grasses ou maigres ;
Les chaux faiblement hydrauliques ;
Les chaux moyennement hydrauliques ;
Les chaux hydrauliques proprement dites ;
Les chaux éminemment hydrauliques ;
Les chaux limites ;
Les ciments.

La prise d'une chaux n'est pas toujours facile à constater exactement. Sa durée varie beaucoup suivant le quantité d'eau incorporée à la chaux et suivant l'intensité du malaxage. En outre, si la chaux reste exposée à l'air, elle s'évente, et passe successivement d'une classe à l'autre. Il est donc difficile de déterminer, d'après ce seul caractère, la catégorie où elle doit être rangée.

La composition chimique fournit, au contraire, une base fixe et infaillible de classification.

On a remarqué, en effet, que non seulement la silice et l'alumine concourent à peu près seules à l'hydraulicité, mais encore que le degré d'hydraulicité est en relation avec la dose de ces éléments, et qu'une chaux est

placée d'autant plus haut dans la série qu'elle en contient davantage, jusqu'à une certaine limite où les produits ne sont plus assimilables à des chaux.

Pour calculer cette dose, il faut faire d'abord abstraction des matières inertes, et prendre seulement le rapport du poids de l'argile (silice combinée et alumine) à la chaux caustique réelle.

Ce rapport est désigné sous le nom d'*indice d'hydraulicité*.

Le tableau suivant indique entre quels indices se classent les divers produits énumérés ci-dessus :

DÉSIGNATION	INDICES D'HYDRAULICITÉ
Chaux grasse ou maigre...........	de 0,00 à 0,10
— faiblement hydraulique......	de 0,10 à 0,16
— moyennement hydraulique...	de 0,16 à 0,31
— hydraulique proprement dite.	de 0,31 à 0,42
— éminemment hydraulique....	de 0,42 à 0,50
— limite, ou ciment à prise lente	de 0,50 à 0,65
Ciment à prise rapide..............	de 0,65 à 1,20

66. Observation. — La classification résultant de la composition chimique, bien que la plus sûre, se trouve quelquefois modifiée en pratique, surtout dans les ciments. Leur mode de fabrication, et surtout leur degré de cuisson, a une influence considérable sur la qualité des produits. C'est ainsi que le même calcaire peut quelquefois donner à volonté du ciment portland, au lieu de chaux éminemment hydraulique. Certains ciments à prise rapide auraient pu être des ciments à prise lente, dont ils ne diffèrent que par la préparation et non par la composition chimique.

§ 2. — Composition chimique des sables, des pouzzolanes, de l'argile et du platre

67. Sables. — Les sables sont les substances que l'on mélange le plus habituellement avec la chaux pour constituer les mortiers. Ils sont formés par la désagrégation spontanée des roches naturelles, telles que les granits, les grès, les calcaires arénacés, les quartz, les basaltes, dont une partie a été dissoute ou entraînée par les eaux : le résidu constitue le sable. Les calcaires purs ou marneux donnent rarement du sable; ils sont trop tendres et se réduisent en poudre entraînée par les eaux sous forme de boue. Le sable est produit, en outre, par le frottement mutuel des matériaux que charrient les fleuves et que roule la mer sur les rivages.

Les sables se classent, d'après leur composition chimique, en quartzeux ou siliceux, feldspathiques, calcaires, etc. Mais cette classification est sans grande importance, la chaux paraissant n'avoir aucune action chimique sur les sables dans les mortiers.

C'est d'après leur état physique, la grosseur et la forme de leurs grains, que les sables ont une influence plus ou moins marquée sur la qualité des mortiers et se distinguent les uns des autres.

68. Pouzzolanes. — Si les chaux sont sans action chimique sur les sables ordinaires, on rencontre, au contraire, dans la nature, et l'homme fabrique artificiel-

lement, des produits, connus sous le nom générique de *pouzzolanes*, qui sont attaqués par la chaux et forment avec elle des mortiers hydrauliques, alors même que la chaux serait absolument grasse.

Ces produits sont fort nombreux. On a vu qu'en faisant cuire de l'argile au contact de la chaux on obtenait des chaux hydrauliques. Si l'on fait cuire la chaux et l'argile séparément, et qu'on les mélange à froid, on obtient aussi des mortiers durcissant sous l'eau.

Toutes les substances qui se composent d'argile cuite, ou qui en renferment de notables proportions, jouissent de cette propriété et se classent parmi les pouzzolanes.

69. Pouzzolane naturelle. — La pouzzolane était connue des anciens. Vitruve en signale les propriétés hydrauliques avec admiration. Elle doit son nom à la ville de Pouzzoles, située dans la baie de Naples, au pied du Vésuve, d'où on la faisait venir uniquement à l'origine.

Dans les temps modernes, on a trouvé des pouzzolanes dans beaucoup d'autres contrées, et des recherches suivies en auraient fait découvrir encore plus, si l'usage des chaux hydrauliques et des ciments n'en avait presque annulé l'emploi. La seule qui soit encore en usage est le trass de Hollande, employé aux travaux du nord de la France.

L'analyse chimique a fait reconnaître que ce n'était qu'une argile plus ou moins cuite. Ses éléments principaux sont, en effet, la silice et l'alumine, avec de l'oxyde de fer, souvent en assez forte dose, de la chaux, de la magnésie et des alcalis. La silice y est partiellement à l'état gélatineux.

On a aussi employé avec succès, pour favoriser l'hydraulicité des chaux, d'autres substances naturelles, telles que les sables connus sous le nom d'arènes ou de psammites, et la gaize ou pierre morte des Ardennes.

70. Pouzzolane artificielle. — Toutes les pouzzolanes, et la plupart des autres substances naturelles analogues, doivent leurs propriétés à la dose d'argile cuite qu'elles renferment. Si c'est de l'argile en partie crue, sa qualité augmente considérablement par la cuisson. Cette remarque a conduit à fabriquer de toutes pièces des pouzzolanes artificielles en calcinant des argiles.

Il y a longtemps que l'on emploie, sous le nom de *ciment de tuileau*, des débris de briques et de tuiles broyés en poudre fine.

Pour les grands travaux, on s'est servi de pouzzolane artificielle fabriquée spécialement. Sa préparation a donné lieu à des études approfondies, à une époque où les chaux hydrauliques étaient moins répandues, et où l'on faisait encore des objections à leur emploi sur une grande échelle.

71. Ciment de laitier. — Il y a longtemps que l'on a signalé les cendres de houille, le mâchefer et les laitiers de hauts-fourneaux, réduits en poudre impalpable, comme de nature à être employés aux mortiers hydrauliques en guise de pouzzolane. Mais ce n'est que depuis peu d'années que cette remarque a donné lieu à une application industrielle. On fabrique aujourd'hui sur une grande échelle, sous le nom de ciment de laitier, un produit analogue au ciment de Portland, qui s'obtient en mélangeant avec de la chaux éteinte en poudre certains

laitiers de hauts-fourneaux, convenablement choisis et amenés préalablement à un état particulier, appelé granulation, par le refroidissement brusque de leur masse incandescente à la sortie des hauts-fourneaux.

72. Argile. — L'argile à l'état naturel est peu employée dans les constructions. On n'en fait guère usage que pour les batardeaux et les corrois destinés à recouvrir les terrains perméables qui doivent retenir l'eau. Mais l'argile déshydratée et durcie par la cuisson est la base des briques et des tuiles, dont l'emploi est si général.

L'argile pure est un hydrosilicate d'alumine remarquable par sa plasticité et par le retrait qu'elle éprouve dans la cuisson. Elle se rencontre rarement sous cet état dans la nature, et elle n'est pas alors recherchée par l'industrie, car on est obligé de dégraisser les argiles trop grasses en y ajoutant du sable ou de la marne.

Les argiles naturelles sont presque toujours déjà mélangées de sable. On y trouve aussi, en proportion variable, des matières minérales qui en modifient les propriétés. Ainsi, l'oxyde de fer les rend fusibles dès qu'il dépasse une certaine dose; il en est de même des alcalis, qui se rencontrent en petite quantité dans presque toutes les argiles. Le carbonate de chaux, s'il n'est pas disséminé dans la masse, mais se présente en grains, donne à la cuisson des noyaux de chaux vive, qui, par l'extinction, se gonflent et font éclater la brique. Les pyrites ferrugineuses se décomposent et dégagent de l'oxyde de fer, qui donne lieu à des taches noires et à des fusions locales.

73. Plâtre. — Le plâtre est le produit de la cuisson du gypse, ou sulfate de chaux hydraté. La cuisson n'a pour effet que d'enlever au gypse son eau de combinaison.

Outre le sulfate de chaux hydraté, la pierre à plâtre renferme presque toujours un peu de carbonate de chaux et de magnésie, dont la présence ne paraît pas nuire à la qualité du produit, et des traces d'oxyde de fer et d'alumine.

Mais, dans le plâtre, il se rencontre aussi des particules de charbon et des cendres, provenant du combustible qui a servi à la cuisson. Le charbon donne au plâtre une teinte grise, et les cendres en altéreraient la qualité si elles étaient en trop forte proportion.

§ 3. — Analyse des calcaires

On a vu, au n° 55, que les pierres calcaires, outre le carbonate de chaux, renferment presque toutes, en dose variable, divers autres éléments dont les plus importants, au point de vue de la fabrication de la chaux, sont la silice et l'alumine. L'analyse d'un calcaire a pour objet de déterminer la proportion dans laquelle ces différents corps s'y trouvent réunis.

74. Attaque. — Les calcaires doivent être réduits en poudre, mais il n'est pas nécessaire que cette poudre soit très fine.

L'analyse porte sur 1 ou 2 grammes de la matière.

La pesée faite dans une capsule de platine tarée, on

vide le contenu de la capsule dans une petite fiole à fond plat, en s'aidant d'une barbe de plume pour faire tomber les dernières parcelles. On noie la matière dans 20 centimètres cubes d'eau distillée environ ; puis, on y ajoute 10 centimètres cubes d'acide chlorhydrique pur concentré, ou le double de ce même acide étendu de son volume d'eau.

L'acide chlorhydrique attaque le carbonate de chaux et chasse l'acide carbonique, qui s'échappe avec effervescence. Quand l'effervescence a cessé, on chauffe la liqueur doucement, en évitant de la porter à l'ébullition, pour ne pas attaquer l'argile.

Le résidu insoluble se compose de sable siliceux et d'argile.

La liqueur renferme toute la chaux et la magnésie, ainsi que l'oxyde de fer et l'alumine, qui ne sont pas en combinaison intime dans l'argile.

75. Résidu insoluble dans les acides. — On met un entonnoir avec un filtre sur une fiole un peu plus grande que la première et on y verse le contenu de celle-ci, qu'on lave plusieurs fois à l'eau distillée, de façon à faire tomber sur le filtre les dernières traces de la matière insoluble. Puis, on lave plusieurs fois à l'eau chaude le filtre lui-même. Le lavage est complet, quand une goutte de liqueur recueillie dans un tube ne trouble plus le nitrate d'argent.

Lorsque l'entonnoir est bien égoutté, on le porte au bain de sable pour faire dessécher le filtre et son contenu. Après dessiccation, on les place dans une capsule de platine tarée, on les grille sur un brûleur et on les pèse. Le poids obtenu, déduction faite des cendres du filtre, est celui du résidu insoluble dans les acides, qui

se compose d'argile, et quelquefois de sable plus ou moins grossier.

79. Alumine et peroxyde de fer. — La liqueur filtrée reçoit quelques centimètres cubes d'acide azotique et est portée à l'ébullition pendant un moment; les sels ferreux, s'il y en a, se trouvent transformés en sels ferriques. On laisse la liqueur se refroidir et, sans attendre son complet refroidissement, on sursature par un léger excès d'ammoniaque; il se produit un précipté d'oxyde de fer et d'alumine.

Ce précipité, très difficile à laver, entraîne en outre avec lui une certaine quantité de chaux et de magnésie; même, si cette dernière base est en quantité un peu forte, la proportion de magnésie entraînée est souvent très considérable. Si le précipité est faible, on peut, à la rigueur, négliger les matières entraînées, d'autant plus que, dans ce cas, le lavage est plus facile; mais, si la quantité de peroxyde de fer et d'alumine est forte, il est nécessaire, pour avoir ces oxydes dans un état de pureté suffisant, de les dissoudre et de les précipiter à nouveau.

On peut opérer de la façon suivante : le précipité étant recueilli sur un filtre, on place sur la fiole ayant servi à la précipitation un autre entonnoir à large ouverture, dont on a coupé la queue ; puis, on y fait tomber le précipité, en ayant soin de ne pas endommager le filtre. On y parvient facilement en soutenant le petit entonnoir chargé de son filtre au-dessus du second entonnoir, et le maintenant incliné, la queue horizontale ; on lance avec précaution un jet de la pissette qui détache à peu près complètement le précipité. On chasse dans la fiole les particules qui pourraient être adhérentes aux parois de l'en-

tonnoir, qu'on remplace alors par celui qui est garni du filtre, et comme un peu du précipité pourrait y être resté, on l'en débarrasse par un lavage à l'eau tiède acidulée, suivi d'un lavage à l'eau pure.

Le filtre est alors prêt de nouveau à recueillir le précipité. On ajoute dans la fiole un peu d'acide, de façon à dissoudre complètement les oxydes qui y ont été chassés, on chauffe légèrement et on précipite pour la deuxième fois par l'ammoniaque. Si l'on a affaire à une substance riche en magnésie, il est quelquefois nécessaire de répéter l'opération. Quoi qu'il en soit, on termine par un lavage à l'eau chaude, on sèche et, après dessiccation, on fait un dernier lavage, qui enlève encore fort souvent une petite quantité de chaux qu'on joint à celle qui a déjà été séparée par filtration.

Le peroxyde de fer et l'alumine peuvent alors être considérés comme purs; ils se présentent, après calcination, sous forme d'un sable pulvérulent n'absorbant pas l'humidité de l'air et très facile à peser.

77. Oxyde de manganèse. — On a supposé, lors de la précipitation par l'ammoniaque, que la liqueur ne renfermait pas de manganèse; cependant, presque tous les calcaires en contiennent. Si la quantité est faible, on en néglige généralement la détermination; si la quantité est appréciable, au lieu de précipiter par l'ammoniaque, on pourrait procéder ainsi : Après séparation du résidu insoluble et traitement de la liqueur par l'acide nitrique, on sature à chaud par le carbonate de soude ajouté peu à peu, de façon à obtenir, après cette opération, une liqueur très légèrement trouble, c'est-à-dire renfermant à l'état de précipité une faible fraction de l'oxyde de fer ou de l'alumine.

On additionne alors d'acétate de soude, et l'on porte à l'ébullition sur un feu doux, afin d'éviter les soubresauts qui pourraient amener la rupture de la fiole ou des projections du liquide.

Le peroxyde de fer et l'alumine sont ainsi précipités à l'état d'acétates basiques ; on les recueillesur un filtre et, après lavage sommaire, on les redissout et on précipite une seconde fois, afin d'obtenir une séparation complète des corps entraînés.

Les liqueurs filtrées sont réunies, puis le tout est additionné d'un peu de brome. On maintient à une douce chaleur ; l'oxyde de manganèse se précipite, et on termine l'opération par l'addition d'ammoniaque ajoutée en petit excès.

Le précipité est recueilli sur un filtre. Souvent une petite quantité de l'oxyde de manganèse reste adhérente aux parois de la fiole ; en la traitant par l'acide chlorhydrique fort, on la dissout facilement à froid, puis, sans chauffer, on précipite par l'ammoniaque. On réunit ce petit précipité au précipité déjà obtenu ; on termine le lavage, et, après calcination, on a le manganèse sous forme d'oxyde salin (Mn^3O^4).

Cette séparation du manganèse exige, quand il est en faible quantité, beaucoup d'attention et une certaine habitude de l'analyse, ce qui en rend l'emploi difficile pour les personnes peu au courant des manipulations chimiques.

On doit à Leclerc un procédé de dosage, qui repose sur une réaction du manganèse indiquée par Fresenius, et qui permet une détermination rapide et facile de ce corps. La matière est dissoute à chaud dans l'acide nitrique après séparation des substances insolubles ; la liqueur filtrée est rendue très acide au moyen de

l'acide nitrique, puis est chauffée vers 80 ou 90°. On ajoute alors du peroxyde de plomb ; tout le manganèse passe à l'état d'acide manganique, et la liqueur prend une belle coloration violette. On filtre sur un tampon d'amiante et on détermine la quantité de manganèse au moyen d'une solution titrée d'azotate d'oxydule de mercure ; ce sel, s'oxydant à froid aux dépens de l'acide manganique, amène une décoloration progressive, puis complète, de la liqueur.

On verse la solution titrée à l'aide d'une burette graduée, et du volume employé on déduit le titrage de la liqueur en manganèse.

78. Chaux. — A la liqueur séparée de l'oxyde de fer et de l'alumine et, s'il y a eu lieu, du manganèse, on ajoute de l'oxalate d'ammoniaque en petit excès, soit par exemple 3 grammes environ pour 2 grammes de calcaire supposé dans l'échantillon.

Cet oxalate d'ammoniaque est dissous dans une petite quantité d'eau, puis est ajouté à la liqueur froide. Il est nécessaire, en présence de la magnésie, que cette précipitation ait lieu à froid, car, si l'on élève la température, il se forme un oxalate anhydre de magnésie, extrêmement peu soluble, même dans les liqueurs chargées de sels ammoniacaux.

On obtient ainsi de l'oxalate de chaux pur, qu'après dessiccation on introduit dans un creuset de platine et que l'on chauffe au soufflet d'émailleur.

Par calcination progressive, poussée et maintenue au rouge vif pendant cinq minutes au moins, l'oxalate de chaux se transforme complètement en chaux caustique que l'on pèse en portant le creuset sur la balance dès qu'il est refroidi.

Après la pesée, on s'assure de la pureté de la chaux aux caractères suivants : elle doit se présenter sous forme de petits fragments, car si le produit obtenu après calcination était pulvérulent, on pourrait être certain que la chaux est souillée par de la magnésie précipitée avec elle à l'état d'oxalate ; elle doit être d'un blanc pur ; mouillée par quelques gouttes d'eau, elle doit s'échauffer et se gonfler sensiblement ; enfin, lorsque l'hydratation est terminée, elle doit se dissoudre sans effervescence dans l'acide chlorhydrique dilué.

Si l'on ne disposait pas d'un moyen suffisant pour calciner l'oxalate de chaux au rouge vif, on le calcinerait à la flamme d'une lampe à alcool ; à cette température, il se transforme intégralement en carbonate de chaux, dont le poids, multiplié par le facteur 0,56, donne la chaux caustique correspondante.

79. Magnésie. — La liqueur ne renferme plus que la magnésie, avec les sels ammoniacaux que l'on a introduits en cours d'analyse. On la précipite en se servant de phosphate de soude. On laisse reposer à froid une demi-journée au moins avant de filtrer, afin d'être assuré que le phosphate ammoniaco-magnésien qui se forme s'est entièrement cristallisé, ou du moins qu'il n'en reste plus que des traces insensibles en dissolution.

Quand on a achevé de filtrer cette dernière liqueur, une partie notable des cristaux restent adhérents aux parois de la fiole, et ne peuvent s'en détacher par les lavages. Il faut recourir à un artifice qui a son application dans tous les cas semblables : on verse dans la fiole quelques gouttes d'acide, et on promène cette petite masse de liquide le long des parois de la fiole, de façon à dissoudre toutes les parcelles adhérentes. On ajoute ensuite de l'am-

moniaque, et le précipité se reproduit instantanément sous forme de cristaux grenus non adhérents, que des lavages entraînent facilement sur le filtre.

Le lavage tant de la fiole que du filtre doit être fait avec de l'eau froide préalablement chargée d'ammoniaque. L'eau pure, surtout si elle est chaude, dissout une proportion notable de phosphate ammoniaco-magnésien.

Le précipité, après dessiccation, est grillé avec le filtre. Les $\frac{40}{111}$ de la pesée, déduction faite des cendres du filtre, donnent le poids de la magnésie.

80. Eau et acide carbonique. — Pour terminer l'analyse, il n'y a plus qu'à déterminer la proportion d'eau, d'acide carbonique et de produits volatils ou combustibles. A cet effet, une nouvelle dose de l'échantillon est pesée dans un creuset taré, puis calcinée vivement au chalumeau d'émailleur pendant cinq à dix minutes. Le creuset, aussitôt refroidi, est pesé avec son contenu, qui se compose de la chaux et des autres éléments fixes. La différence est la *perte au feu.*

Ajoutée à tous les éléments dosés antérieurement, cette perte au feu doit reproduire un poids égal à celui de l'échantillon sur lequel on a opéré.

81. Analyse du résidu insoluble. — Si le résidu insoluble dans les acides renfermait des pyrites, ce qui, par exemple, se présente pour presque tous les calcaires argileux du lias, on pourrait opérer ainsi : Le résidu, recueilli sur un filtre après avoir été bien lavé, est chassé au moyen du jet de la pissette dans une capsule de porcelaine ; comme le volume de l'eau employée pour cette

opération est toujours considérable, on évapore de façon à le réduire à quelques centimètres cubes.

On traite alors le résidu soit par une solution d'acide hypochloreux, soit par un peu d'acide azotique auquel on ajoute quelques cristaux de chlorate de potasse ; en chauffant légèrement, le soufre des pyrites passe à l'état d'acide sulfurique, et le fer à l'état de sel ferrique.

L'oxydation terminée, on sépare l'argile et le sable par filtration et, dans la liqueur filtrée, on précipite l'oxyde de fer par l'ammoniaque ; le peroxyde de fer est recueilli sur un filtre.

La liqueur, débarrassée du fer, est portée à l'ébullition ; lorsque l'ammoniaque est disparue, on acidifie par quelques gouttes d'acide et on y verse, en évitant d'en employer un trop grand excès, une solution de chlorure de baryum, qui précipite l'acide sulfurique sous forme de sulfate de baryte.

Ces deux précipités permettent de calculer le fer et le soufre combinés à l'état de pyrite (bisulfure de fer).

Quant au reste du résidu insoluble, il peut être analysé comme il sera indiqué au § 5, qui traite de l'analyse des argiles. Mais, le plus souvent, il suffit de séparer mécaniquement le sable des parties argileuses par lévigation, en procédant comme il suit :

On place 10 grammes de l'échantillon au fond d'un verre, et on les attaque par l'acide chlorhydrique affaibli. Quand l'attaque est terminée, on remplit d'eau le verre, on agite vivement avec une baguette, et on laisse reposer quelques secondes. Le sable tombe immédiatement au fond, et l'argile reste en suspension. On décante la liqueur trouble et on recueille le sable, que l'on dessèche et que l'on pèse. Une seule lévigation suffit rarement ; après la décantation, on ajoute de l'eau pure, on agite de nouveau

et on décante encore après repos. L'opération doit être renouvelée jusqu'à ce que la liqueur ne se trouble plus du tout par l'agitation.

82. Séparation de l'oxyde de fer et de l'alumine. — Il y a plusieurs méthodes pour séparer l'alumine du peroxyde de fer. On en citera trois qui sont d'une application assez facile.

Après avoir calciné et pesé les deux bases, on les fait digérer à chaud avec de l'acide chlorhydrique, qui les redissout, et l'on opère sur cette liqueur.

1° *Emploi du sulfhydrate d'ammoniaque.* — Cette méthode consiste à mêler à la liqueur assez d'acide citrique ou tartrique pour que l'ammoniaque en excès n'y produise plus de précipité, puis à ajouter du sulfhydrate d'ammoniaque. L'alumine n'est pas précipitée (n° 8), tandis que le fer passe à l'état de sulfure de fer insoluble. On fait bouillir et on recueille le sulfure de fer sur un filtre. On le dessèche et on le grille sur un brûleur ; le sulfure se décompose et fait place à du peroxyde de fer, que l'on pèse comme à l'ordinaire.

L'alumine est la différence entre le poids du résidu total et celui du peroxyde de fer. Si on veut la doser directement, il faut évaporer à sec dans une capsule la liqueur d'où l'on a ôté le fer, puis griller au moufle le résidu de l'évaporation, que l'on reprend par l'eau pure et que l'on jette sur un filtre. Ce résidu ne renferme que l'alumine. Mais cette opération est longue et difficile, par suite de l'état sirupeux que conserve la liqueur pendant l'évaporation.

2° *Emploi de la potasse.* — La séparation des deux bases se fait souvent par la potasse. On évapore la plus grande partie de la liqueur chlorhydrique, de façon à n'avoir qu'un

léger excès d'acide, puis on y verse une dissolution de potasse pure en excès, et l'on fait bouillir jusqu'à ce que le précipité obtenu présente une teinte rouge brun presque noir. On filtre et on lave avec soin le précipité de peroxyde de fer. Dans la liqueur, on précipite l'alumine en y versant un sel ammoniacal.

Le peroxyde de fer retient toujours une dose notable d'alumine et reste mêlé de potasse. Pour en séparer le reste de l'alumine, on le redissout dans l'acide chlorhydrique et on recommence l'opération précédente en ménageant la dose de potasse. Le sel ammoniacal donne presque toujours un nouveau précipité avec la liqueur. Il est bon de recommencer une troisième fois, et même davantage, jusqu'à ce que le sel ammoniacal ne trouble plus la liqueur.

Une fois ce résultat obtenu, le précipité, qui retient encore de la potasse, doit être redissous une dernière fois, puis formé de nouveau par l'ammoniaque. Il est alors facile à recueillir pur et à laver.

On voit que ce procédé, simple en théorie, demande des soins minutieux et beaucoup de temps.

3° *Emploi de la liqueur titrée de permanganate de potasse.* — On peut, enfin, déterminer la dose de fer par l'emploi des liqueurs titrées, en se servant d'une dissolution de permanganate de potasse. Il faut, dans ce cas, filtrer la liqueur chlorhydrique avant de s'en servir, afin qu'elle ne retienne aucune parcelle de charbon provenant du filtre avec lequel les bases avaient été grillées.

La dissolution de permanganate de potasse, qui est d'un rouge très vif, se décolore lorsqu'on la met en présence d'un sel de fer au minimum maintenu fortement acide. Ce sel se peroxyde aux dépens du permanganate, qui se décompose en potasse et protoxyde de manga-

nèse, et ces deux bases se dissolvent dans l'acide en excès.

Si donc, dans une dissolution qui renferme du fer au minimum, on verse goutte à goutte du permanganate de potasse, en ayant soin d'agiter continuellement, les premières gouttes se décolorent ; mais aussitôt que tout le fer est peroxydé, la liqueur prend une teinte rose. Le volume employé pour obtenir ce résultat peut donc servir de mesure à la quantité de fer au minimum.

A cet effet, on détermine d'abord le titre de la liqueur colorée. On prend un poids connu, 1 gramme par exemple, de fer métallique parfaitement pur ; du fil de clavecin très fin et bien brillant peut servir pour cet usage. On le dissout dans 25 centimètres cubes environ d'acide chlorhydrique concentré, puis on étend la liqueur jusqu'à 100 ou 200 centimètres cubes au moyen d'eau fraîchement bouillie.

On met dans un vase à saturation un volume de cette liqueur déterminé au moyen d'une pipette jaugée (n° 34), ou bien la liqueur entière, et on y verse peu à peu le permanganate de potasse en se servant de la burette graduée (n° 34), préalablement remplie jusqu'au zéro des divisions. On agite vivement avec une baguette, en même temps que l'on verse le permanganate, qui se décolore d'abord ; puis, quand on voit apparaître la couleur rose, on cesse de verser, et on lit la division où s'arrête la colonne de liquide. On en déduit son titre.

Supposons, par exemple, que l'on ait opéré sur 1 gramme de fer dissous dans une liqueur étendue à 200 centimètres cubes, et que l'on ait prélevé une pipette de 10 centimètres renfermant, par conséquent, 0 gr. 05 de fer. S'il a fallu employer 253 divisions de la burette pour obtenir la coloration rose, le titre de la liqueur perman-

ganique est $\frac{0 \text{ gr. } 05}{253}$, c'est-à-dire que chaque division de la burette est décolorée par une quantité de fer représentée par cette fraction.

Pour doser le fer au minimum que renferme une liqueur acide, il suffit d'y verser du permanganate au moyen de la même burette et de compter le nombre des divisions employées pour obtenir la coloration rose. Le rapport de ce nombre au nombre trouvé dans l'opération précédente est le même que celui du poids de fer existant dans la liqueur au poids de fer employé pour le titrage.

Ainsi, en se servant du permanganate de l'exemple cidessus, s'il faut en verser dans une dissolution 203 divisions, cette dissolution renferme $x = \frac{203}{253} 0$ gr. 05 de fer, répondant à $\frac{10x}{7}$ de peroxyde de fer.

Le fer se trouve dans les analyses à l'état de peroxyde. Pour appliquer la méthode au dosage par le permanganate de potasse, il faut le ramener au minimum. A cet effet, on ajoute à la liqueur un excès d'acide sulfurique, puis on la fait bouillir en y projetant de petits morceaux de zinc distillé parfaitement pur, jusqu'à ce que la liqueur, de jaune qu'elle était, soit devenue incolore. Le fer se trouve alors ramené à l'état de protoxyde.

Il est nécessaire de reprendre le titre de la liqueur de permanganate chaque fois que l'on s'en sert, car elle s'altère facilement.

Cette méthode ne s'emploie donc avec avantage que lorsqu'on a un grand nombre de dosages à faire dans une même séance.

83. Dosage de l'eau et de l'acide carbonique. — La perte au feu fait connaître ensemble la quantité

d'eau, d'acide carbonique et de produits combustibles que renferme le calcaire. Il peut y avoir intérêt à déterminer ces éléments à part.

1° *Séparation par le calcul.* — Le plus souvent, on se contente de calculer la quantité probable d'acide carbonique, en supposant la chaux et la magnésie à l'état de carbonates, et se servant des équivalents chimiques.

Les $\frac{22}{28}$ de la dose de chaux et les $\frac{22}{20}$ de celle de magnésie représentent le poids de l'acide carbonique.

En déduisant ce poids de la perte au feu totale, on a celui de l'eau et des produits combustibles.

2° *Dessiccation.* — On peut aussi déterminer directement l'humidité contenue dans un calcaire, par une dessiccation à l'étuve maintenue un peu au-dessus de 100°. On retire de temps en temps la capsule pour la peser, et on considère la dessiccation comme complète lorsque deux pesées consécutives sont concordantes.

3° *Dosage direct de l'acide carbonique.* — Enfin, on peut doser directement l'acide carbonique. Le procédé suivant donne des résultats très exacts :

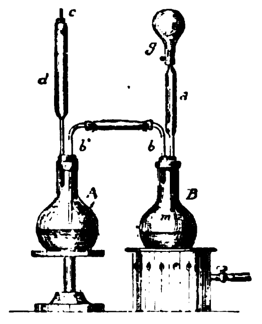


Fig. 18.

On monte un appareil composé de deux fioles A et B (*fig.* 18) avec des bouchons percés chacun de deux trous; dans l'un des trous passe un tube recourbé *b* ou *b'*, et dans l'autre un tube droit évasé *a* ou *d*. Les deux tubes *b*, *b'* sont réunis par un caoutchouc. La fiole B, où l'on place l'échantillon avec un peu d'eau, est mise sur un fourneau que l'on allume vers la fin de l'opération. Le tube droit *a* qu'elle porte est effilé

à la partie supérieure et bouché par une poire *g* en caoutchouc. La fiole A reçoit une dissolution d'ammoniaque. Le tube évasé *d* est rempli de verre pilé imbibé d'ammoniaque, et porte à sa partie supérieure un petit tube de dégagement *c*. Le tube *b'* ne doit pas plonger dans l'ammoniaque, mais se maintenir à quelques millimètres de la surface.

L'appareil étant en place, on débouche la fiole B et on fait plonger la pointe *m* du tube *a* dans une soucoupe où on a mis de l'acide chlorhydrique. En comprimant la poire entre les doigts, on fait sortir du tube de l'air qui est remplacé par de l'acide au moment où on cesse de comprimer la poire. Puis, on rajuste le bouchon sur la fiole B.

L'acide tombe goutte à goutte sur la matière à analyser et en dégage l'acide carbonique, qui se rend dans le vase A où il se combine avec les vapeurs ammoniacales. Il se forme du carbonate d'ammoniaque, qui reste en dissolution dans le liquide de la fiole A et du tube *d*. Quand l'effervescence a cessé, on chauffe pendant quelque temps pour faire passer les dernières parcelles de gaz carbonique dans la seconde fiole.

On sépare alors la fiole A de l'appareil, on lave avec soin les tubes *d* et *b'* en recueillant les eaux de lavage dans la fiole. Enfin, on en verse le contenu dans une autre fiole renfermant de l'eau de baryte; on fait bouillir et on jette rapidement sur un filtre très perméable. L'acide carbonique reste sur le filtre à l'état de carbonate de baryte. On le grille directement ou, mieux, on le redissout par l'acide chlorhydrique, et on y dose la baryte par l'acide sulfurique. L'acide carbonique a un poids égal à celui du sulfate de baryte multiplié par 0,1888.

On se sert aussi d'appareils que l'on pèse avant et

après le dégagement de l'acide carbonique, obtenu par la mise en contact du calcaire avec un acide.

L'appareil représenté (*fig.* 19) est d'une construction facile et donne de très bons résultats.

Il se compose d'un ballon A, d'une capacité de 150 centimètres cubes environ, dans lequel on place un poids connu de l'échantillon dont il s'agit de déterminer la teneur en acide carbonique ; l'échantillon est recouvert d'un peu d'eau, 10 à 15 centimètres cubes.

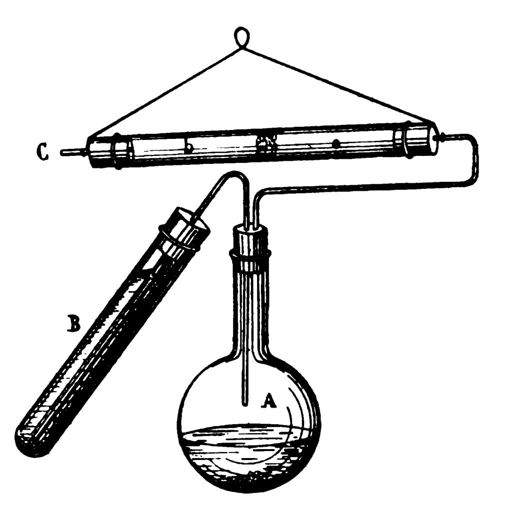


Fig. 19.

Un petit récipient B, renfermant de l'acide chlorhydrique, communique avec le ballon, au moyen d'un tube destiné à faire passer l'acide dans l'eau tenant la matière en suspension. Le ballon est muni d'un autre tube qui conduit le gaz dégagé dans un petit manchon *c* en verre mince qui renferme en *a*, entre deux tampons d'amiante, de la ponce imbibée d'acide sulfurique destiné à retenir la vapeur d'eau et, à la suite, en *b*, une colonne de borax chargée d'absorber l'acide chlorhydrique entraîné.

L'appareil étant préparé et renfermant une quantité connue de la matière à examiner, on le suspend au fléau d'une balance au moyen du fil de laiton indiqué sur la figure, et on en détermine le poids.

On détache l'appareil de la balance et, par une légère aspiration en C, on détermine l'écoulement de l'acide dans le ballon A ; l'effervescence due au dégagement de l'acide carbonique se manifeste aussitôt et, comme le tube d'amenée de l'acide du récipient B au ballon A forme syphon, et que, de plus, une de ses extrémités est à étroite ouverture, on peut régler l'écoulement de l'acide en inclinant ou en relevant l'appareil, de manière à éviter qu'un dégagement trop rapide ne fasse échapper de la vapeur d'eau et de l'acide chlorhydrique.

Lorsque toute réaction apparente a cessé, on termine en chauffant le ballon vers 40°, puis on chasse l'acide carbonique qui pourrait rester emprisonné dans l'appareil par un courant lent d'air sec ; 1 litre passant en un quart d'heure suffit amplement pour obtenir ce résultat.

On pèse de nouveau, et la différence de ces deux pesées donne le poids de l'acide carbonique dégagé.

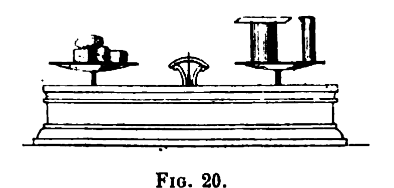
Le dosage de l'acide carbonique se fait rarement sur les calcaires, mais il est souvent intéressant de l'exécuter sur les chaux et ciments, afin de s'assurer si la cuisson en a été complète. Il s'exécute alors de la même façon.

84. Méthodes abrégées d'essai. — L'analyse complète d'un calcaire n'est pas toujours nécessaire, et un essai rapide suffit dans bien des cas. Pour connaître la dose de carbonate de chaux qu'il renferme, on peut se contenter de déterminer seulement la dose de l'acide carbonique ou celle de la chaux. Les trois méthodes abrégées d'essai qui vont être décrites peuvent s'exécuter partout facilement et presque sans matériel de laboratoire.

La première n'exige qu'une balance ordinaire (*fig.* 20) sensible simplement au gramme. On place un poids connu de l'échantillon, 100 grammes par exemple, dans un

grand verre à moitié rempli d'eau, sur un des plateaux de la balance.

Dans un autre vase, tel qu'une éprouvette graduée, on met assez d'acide chlorhydrique pour pouvoir dissoudre entièrement le calcaire. Pour 100 grammes, il faut employer environ 160 centimètres cubes ou 175 grammes de l'acide ordinaire concentré du commerce. On ajoute dans le même plateau un agitateur, et on couvre le premier vase de plusieurs doubles de papier buvard. Puis on établit l'équilibre en plaçant dans l'autre plateau des poids quelconques, des cailloux, du sable, etc. On verse alors une petite portion de l'acide dans le premier vase, en ayant soin de remettre immédiatement le papier buvard à sa place. L'acide carbonique se dégage avec effervescence, et, quand l'effervescence a cessé, on verse une nouvelle portion d'acide chlorhydrique. On continue ainsi jusqu'à ce qu'on l'ait versé tout entier. A la fin, on agite avec la baguette, pour achever le dégagement du gaz carbonique. A mesure que ce gaz s'échappe, le poids diminue dans le plateau et la balance bascule. Quand l'expérience est terminée, on ajoute, pour rétablir l'équilibre, des poids marqués qui donnent la mesure de l'acide carbonique déplacé.


Fig. 20.

La seconde méthode exige l'emploi d'une burette et d'une pipette jaugées.

On verse dans trois verres semblables une pipette d'acide chlorhydrique, que l'on étend d'eau. Dans l'un de ces verres, on jette un poids connu p de carbonate de chaux pur, de marbre blanc par exemple, et dans le

second un même poids de l'échantillon. Ce poids doit être insuffisant pour que la chaux sature tout l'acide chlorhydrique. On peut toujours en être certain, en employant de l'acide chlorhydrique concentré ordinaire du commerce étendu de moitié de son volume d'eau, et opérant sur 1 gramme de matière par pipette de 10 centimètres cubes.

On prépare, d'un autre côté, une dissolution alcaline de potasse ou de soude, ou mieux de saccharate de chaux, telle qu'une pipette d'acide en sature un volume un peu moindre que la capacité de la burette. On y arrive facilement en faisant une dissolution trop concentrée d'abord, puis en plaçant dans un vase une pipette d'acide normal avec de l'eau et de la teinture de tournesol, remplissant la burette de dissolution alcaline, et mesurant combien il faut en verser de divisions pour que la liqueur tourne au bleu. On vide la burette et on étend la dissolution en raison des résultats indiqués par cette expérience.

Lorsque l'attaque du marbre blanc et celle de l'échantillon sont complètes, on ajoute, dans les trois verres que l'on a préparés, quelques gouttes de teinture de tournesol, qui se colore en rouge, puis on verse successivement dans chacun d'eux de la dissolution normale alcaline, au moyen de la burette, en agitant vivement, et s'arrêtant quand le tournesol vire au bleu. On note le nombre de divisions qu'il a fallu employer, N pour l'acide pur, n pour l'acide partiellement saturé par le marbre, et m pour l'acide où l'on a mis l'échantillon. Il est clair que les quantités d'acide resté libre au moment du titrage sont entre elles comme les nombre N, n et m, et que la chaux du marbre et celle de l'échantillon en avaient saturé respectivement des poids proportionnels à $N - n$ et à $N - m$. Le poids du carbonate de chaux correspondant à la chaux contenue dans l'échantillon est donc au

poids p mis en expérience comme $N - m$ est à $N - n$, et, si on le désigne par x, on a :

$$\frac{x}{p} = \frac{N - m}{N - n}.$$

Cette méthode est très précise et permet de n'opérer que sur de faibles volumes de l'échantillon, mais elle donne, confondus avec la chaux, la magnésie, l'alumine et le peroxyde de fer solubles.

La troisième méthode, analogue à la précédente, quant à ses résultats, est un peu moins juste et plus longue, mais elle n'exige pas l'emploi de la burette et de la liqueur alcaline.

On met dans deux verres des doses égales d'acide chlorhydrique, une ou deux pipettes de 10 centimètres cubes par exemple. Dans l'un d'eux, on jette un poids connu de l'échantillon à essayer (1 gramme pour 10 centimètres cubes). On a, d'autre part, un morceau de marbre blanc, que l'on pèse, et que l'on introduit ensuite dans le second verre. Le marbre est attaqué, et il se produit une effervescence tant qu'il reste de l'acide libre. On remue de temps en temps le liquide pour faciliter l'attaque. Lorsqu'elle est terminée, on lave le marbre, on l'essuie, on le dessèche et on le pèse de nouveau. On note le poids P qu'il a perdu. On le porte alors dans le verre où l'on a mis à dissoudre l'échantillon, et on l'y laisse jusqu'à ce que l'acide de ce verre soit saturé. Le morceau de marbre est desséché et pesé comme la première fois. S'il perd alors un poids p, la différence $P - p$ est égale au poids de carbonate répondant à la chaux contenue dans l'échantillon essayé.

§ 4. — Analyse des chaux et ciments

85. Attaque. — Les chaux et les ciments sont le produit des calcaires calcinés à une haute température. Dans cette opération, l'acide carbonique a été chassé, et l'argile s'est combinée à la chaux, en formant des silicates plus ou moins complexes, décomposables par les acides forts. Si donc on essaie de les dissoudre dans l'acide chlorhydrique, il se dégage de la silice gélatineuse, qui ne peut être séparée et recueillie qu'après dessiccation.

On pèse 2 grammes de l'échantillon en poudre, et on les place dans une capsule de porcelaine, avec un peu d'eau à laquelle on ajoute de l'acide chlorhydrique en excès. On évapore à sec au bain de sable, à une température modérée. Pour éviter toute projection, on remue plusieurs fois la masse avec une baguette de verre après que la silice s'est prise en gelée. Quand la dessiccation paraît terminée, on porte la capsule sur un fourneau, et on la chauffe vivement, mais non au rouge, pour chasser les dernières traces d'acide et d'humidité. Après refroidissement, on traite de nouveau la matière par un léger excès d'acide chlorhydrique, et on évapore une seconde fois à sec. Puis, on reprend par de l'eau acidulée. La liqueur doit paraître jaune, et le résidu blanc et non rougeâtre. S'il avait cette teinte, on laisserait la capsule et son contenu chauffer quelque temps au bain de sable, jusqu'à ce que toute coloration rouge eût disparu.

86. Analyse générale. — On jette tout le contenu de la capsule sur un filtre. La poudre blanche que l'on

recueille n'est autre chose que la silice de l'échantillon. On la dessèche, on la calcine et on la pèse comme à l'ordinaire.

La liqueur contient la totalité de l'alumine et du peroxyde de fer, la chaux, la magnésie. On les détermine exactement comme dans les calcaires.

La séparation du fer et de l'alumine, la détermination de l'acide carbonique et de l'eau se font aussi comme pour les calcaires.

La chaux renferme quelquefois des grains de sable siliceux qui se retrouvent avec la silice, bien qu'inertes au point de vue de ses qualités. On le reconnaît au moment de l'attaque où la silice commence à se prendre en gelée. Les grains siliceux restent au fond de la capsule et crient lorsqu'on y promène la baguette de verre. Pour doser ce sable siliceux, on fait dissoudre la chaux dans l'acide chlorhydrique et on laisse la liqueur digérer pendant une journée. Puis, on opère par décantation, comme pour la séparation de l'argile et du sable. Les grains sableux restent au fond ; on les lave, on les recueille et on les pèse.

87. Dosage de l'acide sulfurique et du soufre. — Les chaux et les ciments ont le plus souvent une certaine dose de sulfate de chaux. Pour la déterminer, on prend un poids assez fort de l'échantillon, 5 grammes par exemple, que l'on fait digérer à froid dans une dissolution de carbonate d'ammoniaque pendant vingt-quatre heures environ, en ayant soin d'agiter souvent le mélange, surtout dans le commencement. Le sulfate de chaux est décomposé, et il se produit du carbonate de chaux et du sulfate d'ammoniaque. On filtre, on la sursature la liqueur par l'acide chlorhydrique et on la fait

bouillir pour chasser tout l'acide carbonique ; puis, on y verse du chlorure de baryum, et l'acide sulfurique se précipite à l'état de sulfate de baryte, que l'on recueille sur un filtre, que l'on dessèche et que l'on pèse. On en déduit par le calcul le poids de l'acide sulfurique.

Quelques ciments contiennent du sulfate anhydre de chaux, qui résiste longtemps au carbonate d'ammoniaque ; il est donc nécessaire de renouveler plusieurs fois la solution, jusqu'à ce que celle-ci n'enlève plus d'acide sulfurique au ciment. Il est, dans ce cas, préférable d'attaquer l'échantillon par l'acide chlorhydrique, d'évaporer à sec, puis de reprendre par cet acide dans lequel le sulfate de chaux est suffisamment soluble. On filtre et, dans la liqueur, on précipite l'acide sulfurique à l'état de sel de baryte.

La filtration ne doit pas avoir lieu immédiatement ; il faut laisser le sulfate de baryte se ramasser et la liqueur devenir claire. Comme pour les précipités d'oxalate de chaux, on peut faire bouillir, mais il est préférable de laisser séjourner la fiole où s'est faite la précipitation pendant plusieurs heures dans le bain de sable. On peut filtrer lorsqu'une liqueur parfaitement transparente surnage sur un précipité grenu bien rassemblé.

Les ciments renferment généralement peu de soufre à l'état de sulfure. Cependant ce corps s'y rencontre quelquefois en quantité notable, surtout dans les ciments de laitiers.

On est averti de la présence des sulfures par l'odeur sulfhydrique qui se dégage de ces matériaux lorsqu'ils sont mis en présence d'un acide.

Pour effectuer le dosage du soufre, on met l'échantillon en contact d'une matière oxydante qui transforme les sulfures en sulfates ; on l'attaque, par exemple, par l'eau

régale, ou mieux encore on y ajoute un peu de chlorate de potasse et on l'attaque ensuite avec précaution par l'acide chlorhydrique. On évapore à sec, puis l'analyse se poursuit comme dans le cas précédent.

Le précipité de sulfate de baryte que l'on obtient ainsi provient à la fois de l'acide sulfurique existant dans la matière et de celui formé par l'oxydation des sulfures. La différence entre les deux poids de sulfate de baryte trouvés dans cette opération et dans la précédente, multipliée par 0,1375, donne le poids du soufre des sulfures.

88. Dosage des alcalis. — Les chaux, et surtout les ciments, renferment presque toujours une certaine dose d'alcalis fixes, provenant soit du calcaire d'où ils tirent leur origine, soit de l'argile qu'on a pu y introduire artificiellement, soit même des cendres du combustible. Ces alcalis ont une certaine influence sur la qualité des produits. Il est donc quelquefois intéressant de les déterminer.

On opère sur une prise d'échantillon spéciale, que l'on attaque et dont on sépare les éléments comme dans une analyse courante. Mais on s'arrête après la séparation de la chaux, et on n'introduit pas de phosphate de soude dans la dernière liqueur. On la verse dans une capsule de porcelaine, et on l'évapore à sec ; puis, on la calcine sur un brûleur, ou mieux au moufle, de façon à chasser les sels ammoniacaux et à décomposer les oxalates. Le résidu se compose de sels alcalins et de magnésie libre ou carbonatée. Ce dernier corps étant insoluble, si on reprend par l'eau et qu'on filtre, on obtient une liqueur qui ne renferme plus que les sels alcalins.

La liqueur est évaporée à sec dans une capsule de platine, en présence d'un léger excès d'acide sulfurique, qui

déplace les autres acides. Le résidu est du sulfate alcalin. On le porte au rouge pour chasser tout excès d'acide et on le pèse.

On le reprend ensuite par de l'eau acidulée d'acide chlorhydrique, et on y précipite l'acide sulfurique par le chlorure de baryum. Du poids du sulfate du baryte on déduit celui de l'acide sulfurique. Si on retranche ce dernier poids de celui du sulfate alcalin, la différence représente les alcalis fixes, soude et potasse réunis.

Il est fort rare que l'on ait besoin de connaître séparément la dose de chacun des alcalis. Dans le cas où on le désirerait, on aurait recours aux méthodes exposées plus loin (chap. v).

Lorsqu'il y a dans l'échantillon des quantités notables d'acide sulfurique, le procédé qui vient d'être expliqué peut donner des résultats erronés. Le sulfate de magnésie n'est que partiellement décomposé au moment de la calcination des sels ammoniacaux, et une partie de ce sel se trouve mêlée au sulfate alcalin. On obtient donc, avec les alcalis, un peu de magnésie que l'on pèse avec eux.

Pour se mettre à l'abri de cette cause d'erreur, après avoir chassé les sels ammoniacaux, et repris le résidu par l'eau, on y verse un peu d'eau de baryte, qui précipite la magnésie et donne, en même temps, des composés insolubles avec l'acide sulfurique et l'acide carbonique. La liqueur filtrée ne renferme plus que des chlorures alcalins, des alcalis libres et de la baryte. On la sursature par l'acide sulfurique et on la filtre de nouveau; puis, on l'évapore à sec, on la calcine, et on obtient un résidu de sulfate alcalin, comme dans le cas précédent. L'analyse se termine de la même manière.

§ 5. — Analyse des silicates (argiles, sables, pouzzolanes, etc.)

89. Attaque aux carbonates alcalins. — Les silicates naturels, qui constituent les sables, les argiles, les pouzzolanes et les roches primitives, ainsi que les produits artificiels, tels que les briques, qui ont la même origine, ne sont pas ou ne sont que partiellement dissous par l'acide chlorhydrique, même si on évapore à sec. Pour les rendre attaquables, il faut les fondre avec une base puissante, formant avec la silice une combinaison facile à décomposer ensuite par les acides.

On pèse un poids donné, 1 gramme par exemple, de l'échantillon réduit en poudre fine, et on le place dans un creuset de platine avec cinq fois environ son poids de carbonate de potasse ou de soude ou, mieux encore, d'un mélange de ces deux sels dans la proportion de leurs équivalents, soit 5 parties de carbonate de potasse pour 4 parties de carbonate de soude : il a été constaté que ce mélange est plus fusible que chacun des deux carbonates pris isolément. On mêle intimement les matières ; puis, on porte le creuset au rouge pendant cinq à dix minutes.

Cette attaque demande quelques précautions. La silice déplace de l'acide carbonique, qui s'échappe avec effervescence à travers une matière pâteuse et produit des projections. Il faut donc avoir soin de tenir le creuset bien couvert, mais de façon à pouvoir le soulever de temps en temps pour examiner ce qui se passe. A l'origine, le feu doit être ménagé ; sans cela, l'effervescence produirait une mousse abondante qui soulèverait le couvercle et

passerait par-dessus bords, et l'expérience serait perdue. Vers la fin, lorsque l'effervescence a cessé, on donne un violent coup de feu pendant deux ou trois minutes.

On saisit avec une pince le creuset encore rouge, et on plonge sa partie inférieure à plusieurs reprises dans l'eau froide. Le refroidissement brusque ainsi produit suffit, en général, pour détacher nettement des parois du creuset le culot vitrifié. On le jette dans une capsule de porcelaine. Si on n'a pas réussi à séparer le culot, on met le creuset lui-même dans la capsule avec la matière qu'il contient. On noie la matière dans l'eau, et on la laisse digérer ainsi, jusqu'à ce qu'elle soit tombée en bouillie.

On ajoute alors avec précaution de l'acide chlorhydrique qui dissout toute la masse. Il se produit d'abord une vive effervescence provenant du carbonate resté en excès. Vers la fin, on lave à l'acide le creuset et son couvercle, et on jette les eaux de lavage dans la capsule.

La capsule est portée au bain de sable et évaporée à sec. Le résidu est de la silice que l'on sépare comme dans les chaux (n° 86). L'analyse se continue comme dans les cas précédents.

La matière se trouvant, par suite du mode d'attaque, mélangée avec une grande quantité de chlorures alcalins, les lavages des précipités demandent à être faits avec beaucoup de soin.

90. Dosage des alcalis. — Lorsqu'on veut doser les alcalis contenus dans l'échantillon, ce mode d'attaque ne peut plus être appliqué. Il faut fondre les silicates avec une base qui ne soit pas elle-même un alcali, la chaux par exemple, ou bien les décomposer par le fluor, comme il sera expliqué au numéro suivant.

Pour appliquer la première méthode, on prend de 2 à

4 grammes de l'échantillon broyé aussi fin que possible, on les évapore à sec avec de l'acide chlorhydrique, on reprend par l'eau acidulée et on filtre. On recueille ainsi une première liqueur qui renferme les alcalis solubles dans les acides. Cette liqueur est traitée exactement comme il a été expliqué au n° 88.

Le résidu insoluble est calciné avec son filtre et pesé grossièrement. On le met dans un creuset et on le mélange intimement avec 1/4 de son poids d'alumine pure, et 5/4 de carbonate de chaux pur ou de marbre blanc. Le mélange est porté au chalumeau de Schlœsing et maintenu au blanc pendant dix minutes. Il se forme un verre parfaitement homogène et transparent, que l'on détache en refroidissant brusquement dans l'eau le fond du creuset encore rouge.

Ce verre est porphyrisé au moyen du mortier d'Abich et du mortier d'agate, puis placé dans une capsule de porcelaine avec de l'acide chlorhydrique, qui l'attaque et le dissout. Cette liqueur est évaporée à sec et traitée comme la précédente, avec laquelle on la mélange d'ailleurs si l'on ne tient pas à distinguer les alcalis solubles de ceux qui ne le sont pas.

Si l'on avait intérêt à séparer les deux alcalis, on le ferait comme il sera indiqué au chapitre v (n° 148).

Il reste presque toujours un peu de matière adhérente aux parois du creuset. Pour ne pas la perdre, on met le creuset et son couvercle dans la capsule de porcelaine avec l'acide chlorhydrique, qui finit par tout dissoudre.

On peut aussi, ayant fait à l'avance la tare t du creuset, en prendre le poids P après fusion au chalumeau, et le poids p après que l'on a enlevé tout ce qu'on a pu de la matière vitrifiée. Tous les résultats de l'analyse doivent être alors augmentés dans le rapport de $P - t$ à $P - p$.

Dans ce cas, la seconde liqueur ne peut-être mélangée à la première, car on ne saurait plus calculer la correction.

Cette attaque ne pouvant guère servir que pour doser les alcalis, il faut toujours l'accompagner d'une attaque distincte aux carbonates alcalins pour avoir les autres éléments.

91. Attaque par le fluor. — Un second procédé est fondé sur l'action de l'acide fluorhydrique ou du fluorhydrate d'ammoniaque, qui donnent, le premier à froid, le second à une température peu élevée, du fluorure de silicium volatil, et laissent les bases à l'état de fluorures.

Le fluorhydrate d'ammoniaque, qui est d'un maniement plus facile, doit être préféré.

La matière, finement pulvérisée, est mélangée dans un creuset de platine avec six à sept fois son poids de fluorhydrate. Pour rendre plus intime ce mélange, on en forme une pâte avec un peu d'eau, et l'on malaxe avec une petite spatule de platine, puis l'on dessèche lentement.

Lorsque la pâte est complètement sèche, on chauffe, et la silice se volatilise sous forme de fluorure de silicium en vapeurs blanches. Il faut avoir soin de ne pas élever la température jusqu'au rouge, afin d'éviter la fusion des fluorures fixes qui se forment; dans ces conditions, on obtient ces composés sous forme de poudre fine, que l'on traite par l'acide sulfurique, et qui, dans cet état, sont facilement et entièrement transformés en sulfates, ce qui aurait été très difficilement obtenu si les fluorures avaient été fondus.

On chauffe légèrement, puis on étend d'eau, et l'on jette dans une fiole le produit de l'attaque en ajoutant quelque peu d'acide chlorhydrique pour en faciliter la

dissolution, et l'on termine ensuite suivant la marche ordinaire. La silice est seulement calculée par différence.

Ce mode d'attaque est surtout employé pour doser les alcalis. Dans ce cas, après l'addition d'acide sulfurique, on chauffe lentement pour volatiliser l'excès d'acide et l'on porte au rouge; les sulfates d'alumine et de fer sont décomposés. On traite par l'eau et, dans la liqueur filtrée, on a les sulfates alcalins avec du sulfate de chaux et de magnésie. On ajoute de l'eau de baryte qui précipite l'acide sulfurique et la magnésie; après filtration, on transforme, par un courant de gaz carbonique, les bases en carbonates, on évapore à sec pour éviter la formation des bicarbonates de chaux et de baryte, et, en reprenant par l'eau, on a en dissolution les carbonates alcalins; les carbonates de chaux et de baryte insolubles sont éliminés par filtration.

Ces carbonates alcalins, traités par un peu d'acide sulfurique, sont transformés en sulfates; on évapore à sec dans une capsule de platine, on calcine et on pèse. L'augmentation de poids de la capsule donne le poids des sulfates.

Redissolvant ces corps dans l'eau, on détermine, par précipitation de l'acide sulfurique à l'état de sulfate de baryte, la quantité d'acide sulfurique et, par différence avec les sulfates, on a la quantité d'alcali.

92. Analyse élémentaire des argiles. — Ainsi qu'on l'a vu plus haut (n° 72), il ne s'agit pas tant, dans l'étude des argiles, de déterminer la nature et la proportion des principes qui s'y rencontrent que de reconnaître les éléments dans lesquels ces principes sont combinés. Il ne suffit pas de savoir si l'argile contient de la silice et du fer; il faut s'assurer s'il y a du sable et des pyrites.

Il est donc essentiel de recourir à une analyse en quelque sorte élémentaire.

A cet effet, on traite la matière par de l'acide chlorhydrique étendu, qui est sans action sensible sur l'argile. On dissout ainsi les carbonates terreux, les oxydes de fer et d'alumine. Ces corps sont ensuite séparés suivant les méthodes ordinaires.

Le résidu insoluble, s'il renferme des pyrites, ce qui est facile à constater par un examen à la loupe, est traité par l'acide hypochloreux suivant la marche indiquée au n° 81. La pyrite passe à l'état de sulfate ferrique soluble, dont on détermine les éléments, oxyde de fer et acide sulfurique, en précipitant l'oxyde de fer par l'ammoniaque, et l'acide sulfurique à l'état de sulfate de baryte par un sel de baryum.

Après la séparation de la pyrite, il reste un mélange d'argile, de quartz et quelquefois de sable feldspathique.

Ce mélange est traité dans une capsule de platine par sept à huit fois son poids d'acide sulfurique.

On élève la température pendant quelques heures, de façon à n'évaporer qu'une petite quantité d'acide, et, lorsque l'opération est terminée, on fait tomber le tout dans un ballon où, par l'addition de quelques centimètres cubes d'acide chlorhydrique, l'on achève la dissolution du sulfate anhydre d'alumine qui s'était formé pendant l'attaque. On jette sur un filtre; la liqueur filtrée renferme l'alumine et quelquefois un peu d'oxyde de fer, de chaux et de magnésie. On sépare ces corps comme il a été indiqué.

Sur le filtre reste la silice provenant de la décomposition de l'argile, du quartz et peut-être des détritus feldspathiques; en lavant avec une solution bouillante de carbonate de soude, aiguisée d'un peu de soude caustique,

on dissout la silice. Cette solution, traitée par un acide et évaporée à sec, donne la silice combinée à l'alumine.

On a alors comme résidu le sable siliceux, que l'on pèse.

Au sable siliceux peuvent se trouver mélangés des grains de feldspath. Si l'on veut en connaître la proportion, on peut recourir à un procédé fort simple, qui ne donne qu'un résultat assez grossièrement approximatif, mais suffisant en pratique dans la plupart des cas. On attaque le résidu aux carbonates alcalins, comme il est indiqué au n° 89, et on détermine la dose d'alumine et de peroxyde de fer qui s'y trouve. Le poids du feldspath est environ égal à trois fois cette dose.

Il reste à déterminer l'eau de combinaison, qui entre toujours dans la composition des argiles; on y arrive facilement par une détermination de la perte au feu, qui doit être accompagnée du dosage de l'acide carbonique, si une effervescence dans l'attaque a démontré la présence de carbonates; en défalquant du poids de la perte au feu celui de l'acide carbonique, on a l'eau de combinaison.

§ 6. — Analyses des mortiers et des platres

93. Mortiers. — Les mortiers sont des mélanges de chaux ou de ciments avec des sables ou des pouzzolanes. Leur analyse se fait comme celle des chaux.

Le plus souvent, une semblable analyse ne fournit pas tous les renseignements que l'on cherche. Ce qu'on a intérêt à savoir, c'est surtout dans quelle proportion le sable a été mélangé avec la chaux du commerce ou le ciment employés.

Il est nécessaire pour cela de se procurer des échantillons de ces matières. On en fait l'analyse et on la compare à celle du mortier.

Mais cette comparaison ne peut se faire directement sur l'analyse brute ; la perte au feu des mortiers comprend, outre les éléments volatils de la chaux et du sable, de l'eau introduite dans la fabrication. Il faut donc d'abord faire abstraction de la perte au feu, et comparer entre eux les produits calcinés. On calcule leur composition à cet état, en divisant les doses des divers éléments par $1 - p$, p étant la dose de la perte au feu.

Soient a, a' et A les doses de chaux chimique pure, existant respectivement dans le poids 1,00 de chaux marchande calcinée, de sable calciné et de mortier calciné. Soit, d'ailleurs, x la proportion de chaux marchande calcinée existant dans le poids 1,00 de mortier calciné. On a la relation :

$$ax + a'(1 - x) = A,$$

d'où l'on déduit la valeur de x.

La proportion de sable calciné, existant dans le poids 1,00 de mortier calciné, est $1 - x$.

Le rapport du poids de chaux marchande calcinée au poids de sable calciné est $\frac{1 - x}{x}$.

Pour avoir la proportion dans laquelle les deux éléments marchands ont été mélangés, il faut les supposer ramenés à leur état primitif, en divisant chacun des poids x et $1 - x$ par les valeurs respectives de $1 - p$.

Ce procédé ne réussit toutefois que si la dose de la chaux chimique diffère notablement dans le sable et dans la chaux marchande.

Il se simplifie quand le sable est absolument dépourvu de parties calcaires, car alors $a' = o$ et $x = \frac{A}{a}$.

Quand la chaux est hydraulique, ou qu'il s'agit de ciment, on peut recourir au procédé suivant, qui fournit généralement un résultat assez approché. Il consiste à chercher le poids de silice combinée qui se trouve dans le mortier, et à le comparer au poids de silice combinée existant dans la chaux ou le ciment. A cet effet, on attaque des poids déterminés des deux échantillons par l'acide chlorhydrique, qui dégage la silice combinée à l'état gélatineux et la tient en dissolution. On décante les liqueurs, en ayant soin de bien laver les résidus à l'eau acidulée, puis on les évapore à sec. On reprend par l'eau acidulée, et on jette sur des filtres; la poudre blanche recueillie sur les filtres est la silice cherchée.

Ces deux procédés peuvent se contrôler et permettent de reconnaître jusqu'à un certain point si l'échantillon envoyé au laboratoire est bien celui de la chaux ou du ciment qui a été employé.

94. Plâtre. — L'analyse des plâtres se fait de la même façon, qu'il s'agisse de pierre à plâtre, de plâtre cuit ou de plâtre déjà employé. On opère sur un échantillon réduit en poudre fine, s'il n'est pas pulvérulent par lui-même.

Par une calcination au rouge dans un creuset de platine, on détermine la perte au feu; elle comprend l'eau et l'acide carbonique, ainsi que le charbon provenant du combustible employé à la cuisson, qui se rencontre quelquefois en assez grande abondance dans les produits livrés par l'industrie.

L'acide carbonique peut se doser directement par la méthode qui a été exposée au n° 83.

On peut aussi trouver la quantité d'eau de l'échantillon par une dessiccation à l'étuve. Mais il faut avoir soin de pousser la chaleur jusqu'à une température de plus de 140°, à laquelle seulement le plâtre abandonne son eau de combinaison.

La différence entre la perte au feu et le poids de l'acide carbonique et de l'eau donnerait alors le poids du charbon.

L'analyse des matières fixes se fait de la manière suivante :

On met 1 ou 2 grammes de l'échantillon dans une fiole renfermant une dissolution de carbonate d'ammoniaque, et on laisse digérer à froid pendant vingt-quatre heures, en agitant fréquemment. Le sulfate de chaux est décomposé; il se transforme en sulfate d'ammoniaque soluble et en carbonate de chaux insoluble. On filtre, on lave avec soin la fiole et le filtre, et on dose l'acide sulfurique comme il a été expliqué au n° 87.

Le résidu resté sur le filtre se compose du carbonate de chaux formé aux dépens du plâtre, de celui qui préexistait dans l'échantillon, du résidu insoluble dans les acides, du peroxyde de fer et de l'alumine. On place le filtre sur une fiole et on y verse de l'acide chlorhydrique ; le résidu insoluble est lavé avec soin et pesé après calcination.

La liqueur est traitée comme dans l'analyse courante d'un calcaire.

Avant d'y doser la magnésie, il faut y réunir la magnésie qui a pu passer dans la liqueur où l'on a précipité l'acide sulfurique par la baryte. A cet effet, on sature dans cette liqueur la baryte restée en excès par de l'acide sulfurique, et on la filtre au-dessus de la fiole de l'analyse courante où doit être dosée la magnésie.

CHAPITRE III

MÉTAUX

Les ingénieurs ont souvent à mettre en œuvre les métaux usuels, leurs alliages ou leurs composés. Sans parler du fer dont les applications, sous des formes multiples, sont si importantes, le plomb, le cuivre et le zinc sont utilisés dans maintes circonstances, soit à l'état de métal simple, soit alliés entre eux ou avec l'étain, soit sous forme d'oxydes ou de sels, comme dans les peintures. Le degré de pureté des matières, ou les proportions dans lesquelles les divers métaux entrent dans les alliages, ont une grande influence sur la qualité des produits et, par suite, sur la durée des constructions.

L'analyse des métaux usuels présente donc un intérêt considérable. Sans entrer dans des détails que ne comporte pas le cadre de cet ouvrage, on va faire connaître les analyses courantes auxquelles il est d'usage de soumettre les métaux.

§ 1er. — Composition chimique des métaux employés dans les constructions

93. Fer. — Le fer que produit l'industrie n'est jamais pur, et les différents corps que l'on y rencontre en

modifient les propriétés d'une façon si profonde, même pour de petites variations dans de faibles teneurs, que la production d'un fer d'une composition déterminée constitue une des opérations les plus délicates de la métallurgie.

Les corps que l'on y rencontre presque toujours sont : le carbone, le silicium, le phosphore, le soufre et le manganèse ; ils proviennent du minerai ou du combustible employés à la fabrication. Souvent aussi, quelques corps y sont introduits à dessein, soit pour faciliter l'affinage, soit pour obtenir un produit d'une composition désirée. Le manganèse, par exemple, est fréquemment employé dans ce double but. D'autres métaux, comme le tungstène, le chrome, le nickel, etc., sont aussi quelquefois incorporés au fer dans certains produits spéciaux qui, jusqu'ici, ne sont pas utilisés dans les constructions.

Parmi les corps que l'on rencontre dans le fer, le *carbone* est celui qui lui donne les propriétés les plus remarquables : suivant la proportion dans laquelle il est combiné avec le fer, il peut abaisser son point de fusion de manière à permettre d'utiliser par le moulage le métal fondu, de le durcir plus ou moins fortement par la trempe, de lui faire acquérir une grande élasticité et une grande résistance à la traction.

On distingue le fer doux, à peu près complètement dépourvu de carbone ; l'acier, caractérisé surtout par sa dureté et son élasticité ; et la fonte, qui est le métal fusible.

Il ne peut entrer dans le cadre de cet ouvrage d'indiquer les innombrables produits que l'industrie produit et classe dans l'une ou l'autre de ces catégories, en les caractérisant le plus souvent par une épithète destinée à renseigner sur leurs qualités physiques. Il suffit de rappeler sommairement l'influence que la dose de carbone

peut avoir sur ces qualités, sans aborder des définitions sur lesquelles les métallurgistes eux-mêmes ne sont pas toujours d'accord.

Les aciers renferment moins de carbone que les fontes. La dose en varie de 0,2 à 1,5 environ pour 100. Les aciers sont, en général, d'autant plus doux qu'ils ont moins de carbone. A la dose de 0,2, on obtient des produits extra-doux, qui ne prennent pas la trempe par les procédés ordinaires et ressemblent presque absolument au fer pur, sauf qu'ils ont une plus grande résistance. A la dose de 1,5, on a des aciers qui, par la trempe, prennent une extrême dureté. On les emploie surtout à la fabrication des outils; pour certaines applications, on est obligé de les adoucir par le recuit.

Dans la fonte, la dose du carbone atteint au moins 2 pour 100, et s'élève parfois jusqu'à 5 pour 100. C'est à la forte proportion de carbone que le fer doit la propriété de devenir fusible à une température élevée, ce qui permet de confectionner, par moulage, une foule d'objets métalliques, de formes même très compliquées.

Les fontes sont obtenues directement par le traitement du minerai de fer, dans des conditions telles qu'elles renferment, outre le carbone, de fortes proportions de phosphore, de soufre, de silicium, etc. Le total de ces matières étrangères s'élève souvent à 8 pour 100.

L'affinage de la fonte, qui a pour résultat d'enlever plus ou moins complètement le carbone et les corps étrangers, est le moyen le plus généralement employé pour obtenir le métal des fers et des aciers de diverses qualités.

Le *silicium*, quoiqu'à un moindre degré que le carbone, accroît la résistance à la traction des fers de toute espèce, mais en augmente considérablement la fragilité; même pour une faible teneur, le métal devient incapable

de résister au choc; il perd sa malléabilité et sa ductilité, tant à chaud qu'à froid; de plus, en présence du carbone, il tend à déplacer ce métalloïde et diminue, par conséquent, l'aptitude à prendre la trempe des aciers qui le contiennent.

On le rencontre en grande quantité dans certaines fontes, surtout quand elles ont été produites à une température élevée, et c'est à sa présence qu'on a attribué la mise en liberté du carbone qui occasionne la teinte grise de ces produits.

La présence du *soufre* altère beaucoup la qualité du fer. Il suffit d'une dose très faible de ce métalloïde, par exemple quelques millièmes pour 100, pour rendre le fer cassant à chaud. Ce défaut, déjà fort sensible à la température de 360°, augmente encore au rouge et rend impossible le travail à la forge ainsi que le laminage. De plus, le soufre diminue la faculté qu'a le fer de se souder à lui-même.

Le *phosphore* augmente la résistance statique du fer et semble reculer la limite d'élasticité de ce métal, sans nuire au travail à chaud; mais il le rend très cassant à la température ordinaire, et cette fragilité augmente rapidement avec l'abaissement de la température. Il doit donc être soigneusement enlevé par l'affinage; malheureusement, c'est l'un des éléments qui, dans l'état actuel de la métallurgie, se laisse le plus difficilement éliminer. On le rencontre presque toujours à une dose ne s'abaissant guère au-dessous de 0,10 pour 100 dans les aciers ordinaires, employés à la fabrication des pièces de grandes dimensions, spécialement utilisées dans les constructions, ou encore dans les aciers pour rails.

Le *manganèse*, tout en étant un élément de durcissement et facilitant la combinaison du carbone, s'oppose à

la fragilité produite par la présence du phosphore. Aussi, est-il largement introduit dans les aciers phosphoreux, dont l'oxydabilité est malheureusement accrue par la présence de ces deux corps.

96. Plomb. — Le plomb est un métal très mou, très malléable et le moins tenace des métaux usuels.

Il est employé dans la construction sous forme de feuilles, pour la couverture des édifices et surtout des terrasses, pour l'installation des chéneaux ou bien encore comme revêtement intérieur des réservoirs. Il sert aussi à former des joints et à sceller les fers dans la pierre. On en recouvre certains objets tels que la tôle plombée, destinée à faire des couvertures plus légères que celles en plomb et plus durables que celles en zinc. Les tuyaux de plomb servent pour les petites conduites d'eau et de gaz. Enfin, ce métal entre dans la confection d'un grand nombre d'alliages.

Il est généralement pur et ne renferme que quelques cent millièmes de cuivre, d'argent et quelquefois des traces plus faibles encore de fer, d'arsenic et d'antimoine. Le plomb résiste bien à l'air; il y perd sa belle couleur métallique pour se recouvrir d'une légère couche de sous-oxyde de plomb (Pb^2O) qui lui donne un aspect particulier bien connu, et le met à l'abri d'altérations plus profondes; mais lorsque l'air est saturés de vapeur d'eau et que la température s'élève, il est rapidement attaqué par l'acide carbonique; ainsi les couvertures en plomb, dont les faces extérieures semblent résister presque indéfiniment, sont souvent détériorées sur leurs faces intérieures, dans les parties qui recouvrent un espace clos, lorsqu'elles sont susceptibles de recevoir l'eau condensée de l'atmosphère: ces parties sont rapi-

dement détruites par la formation d'un hydrocarbonate de plomb.

Le plomb employé sous l'eau résiste assez bien, principalement lorsque l'eau renferme des bicarbonates terreux ; il se recouvre alors d'une couche protectrice. Dans les eaux très pures, comme les eaux pluviales, sa résistance est moindre, et l'acide carbonique l'y attaque légèrement.

Les composés du plomb généralement employés sont: l'hydrocarbonate de plomb, ou céruse, base de la couleur blanche et du mastic, et le minium, ou oxyde salin, de couleur rouge orangé, qui est employé aux mêmes usages.

97. Cuivre. — Le cuivre est un métal d'une belle couleur rouge, bon conducteur de l'électricité et de la chaleur. Le cuivre très pur est assez malléable; par le martelage, il s'écrouit et devient dur et élastique. Sa résistance aux agents atmosphériques est très considérable, ce qui le fait employer quelquefois à l'établissement de couvertures et de chéneaux dont la durée est, pour ainsi dire, illimitée. Malheureusement, son prix trop élevé en restreint l'emploi à quelques constructions très soignées ou d'une valeur artistique considérable.

Le cuivre du commerce n'est jamais pur, il renferme toujours quelques millièmes de corps étrangers; ainsi, on y rencontre constamment de l'oxygène, probablement à l'état d'oxydule. Lorsque la quantité de ce métalloïde s'élève à 0,9 pour 100, le martelage du métal devient presque impossible. On le débarrasse de l'oxygène en ajoutant, au moment de la fusion, un peu de phosphore.

Il contient aussi fort souvent de l'arsenic, qui aug-

mente sa ténacité, mais le rend impropre à la fabrication du laiton.

On y rencontre encore des traces d'antimoine, d'argent, de fer et de soufre, mais en quantités assez faibles pour ne pas influer d'une façon sensible sur ses propriétés.

Le cuivre entre dans divers alliages; les principaux sont le bronze et le laiton. Le bronze ordinaire est formé d'environ 90 parties de cuivre pour 10 d'étain. L'addition de 2 à 3 millièmes de phosphore communique au bronze une dureté et une résistance considérables (bronze phosphoreux). L'étain est remplacé par l'aluminium dans le bronze d'aluminium.

Le laiton, formé de 70 parties de cuivre pour 30 de zinc, est d'un moulage facile, et convient à la confection d'un grand nombre de menus objets. Le métal de Muntz, qui renferme 34 de zinc pour 66 de cuivre, convient particulièrement, par sa résistance à l'eau de mer, au doublage des navires.

Le cuivre entre encore dans la composition d'autres alliages, par exemple le nouvel alliage très dur appelé Delta, qui a pour composition : cuivre 60, zinc 38,2, fer 1,8.

98. Zinc. — Le zinc possède une couleur blanc bleuâtre toute particulière.

Quand il est pur, il est assez malléable à la température ordinaire; mais le zinc du commerce renferme toujours du plomb, qui lui fait perdre cette propriété. Il la reprend de 120° à 150°, et, à ces températures, le plomb semble, au contraire, favoriser le laminage; aussi lui en ajoute-t-on quelquefois. Enfin, à une température plus élevée, il redevient cassant, et vers 200° il peut être pulvérisé facilement.

Comme le plomb, le zinc résiste assez bien aux agents atmosphériques ; il se recouvre d'une légère couche d'oxyde de zinc en partie carbonaté, qui préserve l'intérieur du métal. Cette propriété est utilisée, pour empêcher la rouille de se produire, dans le fer galvanisé, qui est du fer recouvert d'une couche de zinc.

Le zinc est très employé dans les constructions; son prix peu élevé et la facilité avec laquelle il peut être travaillé en ont généralisé l'emploi. Il sert à faire des couvertures légères, des gouttières, des tuyaux de descente, des encadrements et des ornements pour les toitures, etc. On l'applique sur les pierres, sur les bois, sur les surfaces en plâtre, pour les préserver des agents extérieurs.

Toutefois, il résiste mal à l'action de l'acide carbonique en dissolution dans l'eau, surtout quand elle est pure, et les eaux pluviales qui ont circulé sur le zinc en renferment presque toujours un peu.

Au contact prolongé de l'eau, le zinc se pique et se détruit peu à peu, sous l'influence de l'acide carbonique dissous, et sans doute aussi des chlorures et nitrates que contient l'eau. Aussi renonce-t-on à l'employer pour les réservoirs.

La dose de plomb que l'on trouve dans le zinc s'élève souvent jusqu'à 2 pour 100. On y trouve, en outre, un peu de fer, de cadmium et parfois de faibles traces d'argent.

Le zinc entre dans la composition du laiton et de divers alliages.

Il est la base de la peinture au blanc de zinc, qui présente sur celle à la céruse l'avantage de ne pas noircir par les émanations sulfureuses, mais qui couvre moins bien et fait des enduits moins résistants aux intempéries.

On a essayé aussi une peinture à l'oxychlorure de zinc, qui est obtenu en délayant de l'oxyde de zinc dans une solution de chlorure de zinc. Cette peinture couvre et résiste bien; mais elle a moins de brillant et se salit plus facilement que les peintures ordinaires.

On utilise encore l'oxychlorure de zinc sous forme d'un ciment métallique, destiné à réparer les épaufrures des pierres de taille, en préparant une pâte avec de l'oxyde de zinc et une solution concentrée de chlorure.

99. Étain. — L'étain est un métal blanc, d'un éclat analogue à celui de l'argent, mou et cristallin. Il est très malléable et peu tenace.

Il est employé dans l'industrie à l'étamage du fer (fer blanc) et du cuivre, mais il n'est pas utilisé isolément dans les constructions; il entre seulement dans la constitution de divers alliages, notamment du bronze.

§ 2. — Analyse des fers, fontes et aciers

Les différents corps qui sont alliés au fer, dans les fers, fontes et aciers, sont généralement en très petite quantité; cependant la plupart en modifient les propriétés d'une façon si profonde, même pour de faibles variations dans leur proportion, que les méthodes d'analyse à employer doivent présenter un grand degré d'exactitude. D'autre part, il n'est pas toujours possible d'avoir recours à des manipulations délicates et demandant un temps considérable; l'industriel ou l'ingénieur, pressés par les besoins de la fabrication ou de la réception des

marchandises, n'ont pas toujours les loisirs nécessaires.

On s'est proposé, dans le présent chapitre, d'exposer les procédés qui joignent, à une assez grande rapidité d'exécution, l'avantage de fournir des résultats suffisamment précis, en se limitant au dosage des éléments que l'on rencontre d'une manière à peu près constante, tels que le carbone, le phosphore, le silicium, le soufre et le manganèse. On a laissé de côté ceux qui, comme le chrome, le nickel, le tungstène, l'aluminium, etc., ne s'y trouvent qu'exceptionnellement et dans certains aciers spéciaux.

On rappellera que la prise d'échantillon doit être faite avec le plus grand soin ; elle doit être prélevée, partie à l'extérieur, partie au centre de la pièce, particulièrement quand celle-ci a été obtenue par fusion, car pendant la solidification il se produit une liquation, qui forme des zones de composition souvent très différente.

100. Dosage du carbone. — Le procédé qui se présente tout d'abord à l'esprit est de soumettre le métal à l'action de l'oxygène à une température suffisamment élevée, et d'amener, par une oxydation complète de tous les éléments, le dégagement du carbone à l'état d'acide carbonique facile à recueillir.

Ce procédé, qui peut donner de très bons résultats, est long et d'une exécution difficile, malgré son apparente simplicité, car sa réussite exige que le métal soit en poudre extrêmement fine ; au commencement de la combustion, l'oxyde de fer formé fond en encroûtant les particules métalliques, ce qui entrave l'action de l'oxygène.

Première méthode. — On peut recourir à d'autres procédés moins longs et plus sûrs.

Il est préférable de soumettre tout d'abord le métal à l'action de chlorures qui le dissolvent et respectent le carbone ainsi que quelques autres corps. On brûle ensuite facilement ce résidu dans un courant d'oxygène et, du poids de l'acide carbonique formé, on déduit le carbone.

Parmi les chlorures, un de ceux qui donnent les meilleurs résultats est le chlorure double de cuivre et de potassium. On traite l'échantillon, réduit en limaille ou en petits copeaux, par douze fois son poids de ce chlorure dissous dans 50 parties d'eau acidifiée par quelques centimètres cubes d'acide chlorhydrique. Le poids prélevé sur l'échantillon, pour cette analyse, doit varier de 3 à 5 grammes, suivant la teneur prévue en carbone. On agite fréquemment, et, au bout d'une demi-heure ou de trois quarts d'heure, l'opération est généralement terminée. On étend d'eau et l'on recueille le résidu renfermant tout le carbone sur un tampon d'amiante placé dans un petit entonnoir. On lave à l'eau chaude en commençant avec de l'eau acidulée à l'acide chlorhydrique, pour terminer avec de l'eau pure. Lorsque le lavage est complet, on porte à l'étuve.

Après dessiccation, on introduit le tout dans un tube (*fig.* 21), garni extérieurement de clinquant, et on place le tube sur une grille à combustion.

On chauffe le tube, et on y fait circuler un courant lent d'oxygène pur.

Ce gaz sort d'un gazomètre pour passer dans une éprouvette à ponce sulfurique, où il se dessèche complètement ; il se rend alors dans le tube où il brûle le résidu.

Les produits de la combustion et l'excès d'oxygène circulent tout d'abord dans un tube garni de sulfate de

cuivre anhydre, destiné à absorber les traces d'acide chlorhydrique et d'eau restées dans le résidu, et à retenir par condensation le peu d'acide sulfurique formé par le soufre. Ils se rendent ensuite dans des boules Liebig, ou tout autre appareil taré renfermant une solution de potasse qui absorbe l'acide carbonique, pour

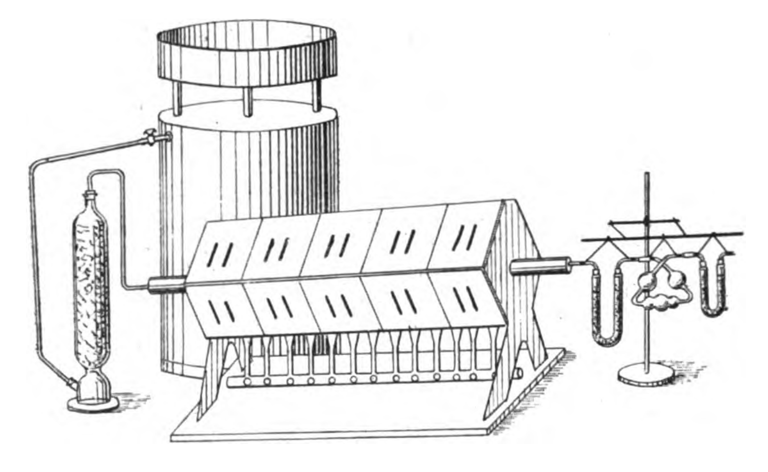


Fig. 21.

s'échapper par un tube en U garni de ponce sulfurique chargée de retenir la vapeur d'eau qui pourrait être enlevée aux boules Liebig.

Le poids de l'acide carbonique est donné par l'augmentation trouvée dans la seconde pesée des boules de Liebig et du tube à ponce sulfurique.

101. Deuxième méthode. — Au lieu d'opérer la combustion par voie sèche, on peut employer une solution d'acide chromique. Pour cela, immédiatement après avoir lavé le résidu, on le fait tomber dans un ballon A (*fig* 22).

Ce ballon, d'une capacité de 300 centimètres cubes environ, renferme une quantité suffisante d'un mélange formé d'une solution concentrée d'acide chromique et

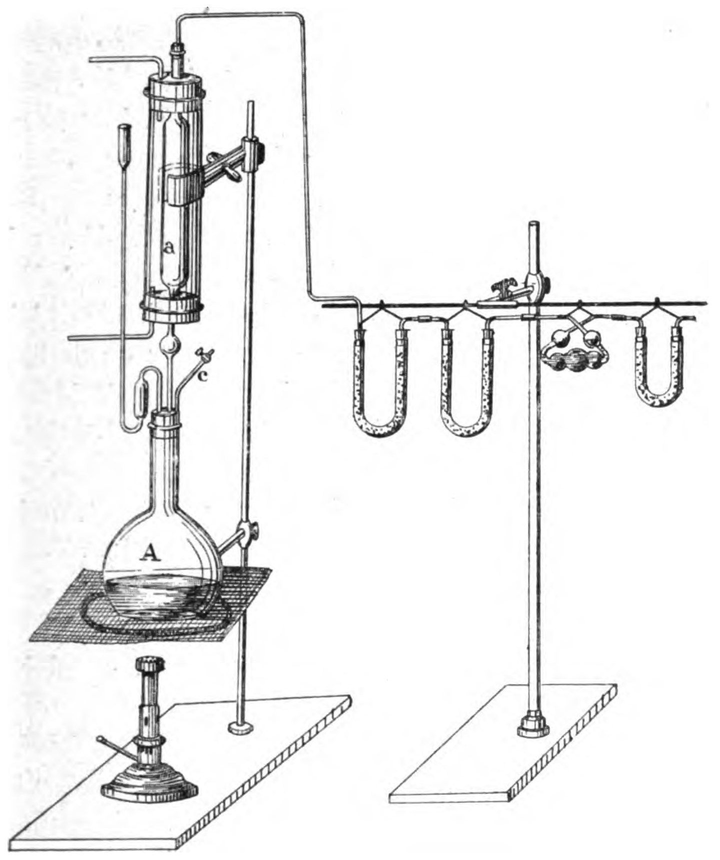


Fig. 22.

d'acide sulfurique (1 partie en poids d'eau, 3 parties d'acide chromique et 2 d'acide sulfurique concentré). En chauffant légèrement, on détermine, avec la combustion du résidu, le dégagement de l'acide carbonique ; ce

dégagement se fait par un tube *a* passant dans un réfrigérant disposé comme l'indique la figure, de façon à permettre le reflux de l'eau qui y est condensée.

L'acide carbonique, débarrassé ainsi de la majeure partie de la vapeur d'eau, passe dans deux ou trois tubes en U renfermant de la ponce sulfurique, où il se dessèche complètement et est, enfin, absorbé dans des boules Liebig.

Lorsque la combustion est terminée, on relie le ballon par le tube *c* à une éprouvette à pied renfermant de la potasse et le tube *d* à un aspirateur. On détermine ainsi un courant d'air dans l'appareil, et on le règle de telle façon que le passage de l'air dans les boules Liebig se fasse bulle à bulle. On porte le contenu du ballon à l'ébullition, et au bout d'une demi-heure tout l'acide carbonique balayé de l'appareil a été chassé dans les boules où il a été absorbé.

Il ne reste plus qu'à peser les boules, et à retrancher de leur poids celui qu'elles avaient avant le passage de l'acide carbonique.

102. Méthode colorimétrique. — On doit à Eggertz, chimiste suédois, un procédé colorimétrique qui permet de doser rapidement le carbone combiné et qui repose sur l'observation suivante :

Lorsqu'on attaque un fer carburé par de l'acide azotique faible, tout le carbone combiné passe à l'état de combinaison organique qui colore fortement la liqueur en brun. Si l'opération est faite, simultanément et dans les mêmes conditions, avec un fer dont on connaît la composition, on conçoit facilement que, par la comparaison des deux colorations, on puisse déterminer la teneur en carbone de l'autre métal.

L'acide azotique employé doit être parfaitement pur, et être étendu jusqu'à ce que sa densité soit de 1,20. Il est nécessaire d'avoir plusieurs types de fers dont la teneur en carbone, déterminée par les méthodes précédentes, soit parfaitement connue.

L'attaque du métal se fait dans un petit tube bouché en verre mince, de $0^{m},10$ de hauteur et de $0^{m},01$ de diamètre, portant une graduation en dixièmes de centimètre cube, dans lequel on introduit 2 décigrammes de limaille fine, puis 2 centimètres cubes d'acide azotique si la teneur en carbone est faible, et 4 à 5 centimètres cubes si la teneur en carbone dépasse 0,03. On attaque en même temps, et dans les mêmes conditions, un même poids d'un type choisi parmi ceux que l'on présume se rapprocher le plus du métal à examiner.

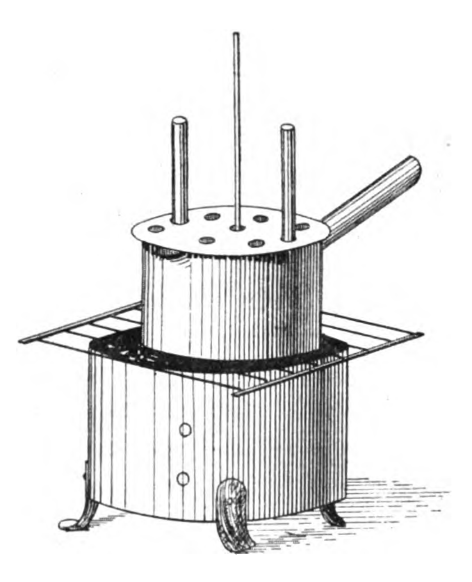


Fig. 23.

Les tubes sont alors placés dans un bain-marie (*fig.* 23) où ils sont chauffés à 80° ; cette température est maintenue jusqu'à ce que les flocons noirs, qui apparaissent dans les premiers temps de l'attaque, soient complètement dissous. On favorise cette dissolution en agitant les tubes de temps en temps, et au bout de deux à trois heures l'opération est terminée. On porte la liqueur provenant

de l'acier type à un volume déterminé, puis on étend plus ou moins l'autre liqueur de manière à obtenir exactement la même teinte.

La teneur en carbone est proportionnelle au volume. Ainsi, si la liqueur type, faite avec un fer renfermant 0,050 de carbone, a été portée à 5 centimètres cubes, chaque centimètre cube correspond à une teneur de 0,010; si, pour le fer examiné, le volume de la liqueur a dû être porté à 6^{cmc},5 pour obtenir une même coloration, sa teneur en carbone sera 0,065. Cette façon de comparer les deux teintes demande l'emploi de tubes construits avec le même verre, dont l'épaisseur et surtout le diamètre soient bien semblables; en outre, la gradation doit être très exacte.

Ces conditions ne sont pas toujours faciles à réaliser et peuvent donner lieu à de légères variations dans les nombres trouvés. Mais, une cause plus grave encore d'incertitude et d'erreurs provient de l'imperfection de la rétine, qui ne peut exactement apprécier simultanément les teintes de liquides placés dans des tubes cylindriques écartés l'un de l'autre.

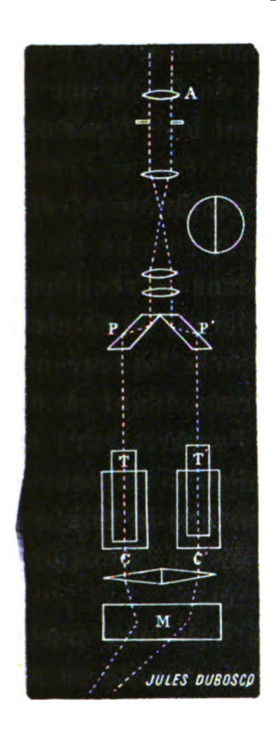
Colorimètre Duboscq. — Le colorimètre construit par M. J. Duboscq est à l'abri de ces causes d'erreurs, et permet d'apprécier les colorations et de juger de leur intensité avec une très grande sûreté.

Dans cet appareil (*fig.* 24), les liquides qu'il s'agit de comparer sont mis dans de petits récipients C semblables, dont les fonds, situés dans un même plan horizontal, sont fermés par des glaces planes, permettant le passage de la lumière envoyée par réflexion au moyen d'un miroir mobile M placé au-dessous.

Des cylindres massifs en verre T plongent dans les récipients. Ils peuvent se déplacer verticalement au

moyen de crémaillères et forment pistons plongeants; en les enfonçant plus ou moins, on fait varier à volonté la hauteur des couches liquides dans les récipients.

Chaque crémaillère court devant une échelle graduée, située derrière la plaque qui supporte l'appareil, et



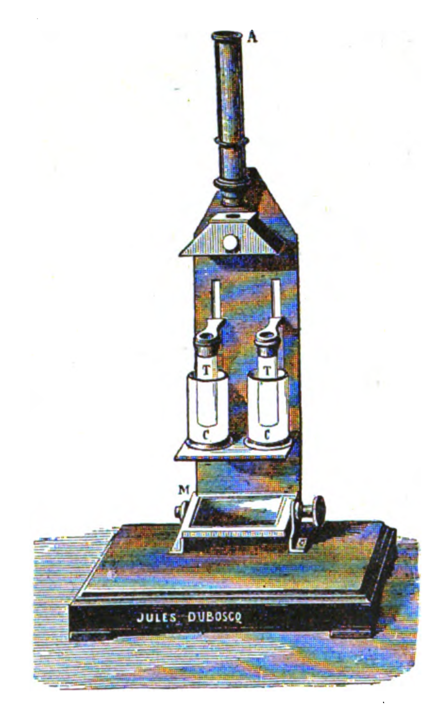


Fig. 24.

porte un repère qui marque zéro quand le cylindre touche le fond du récipient. Cette disposition permet de mesurer l'épaisseur de la couche liquide.

La lumière envoyée par le miroir mobile traverse les liquides et leur emprunte leur couleur. La coloration est d'autant plus intense que la hauteur du liquide est plus grande dans le récipient.

Les deux faisceaux de lumière qui ont traversé les deux

liquides, sont renvoyés par des prismes P à réflexion totale et amenés au contact l'un de l'autre. Une lunette A permet de les observer.

Ce dispositif présente les deux teintes dans un même champ et à un seul œil, et permet de les comparer très correctement.

Pour se servir du colorimètre, on commence par régler le miroir en regardant par la lunette, de façon que les deux moitiés du champ circulaire soient bien également éclairées.

On porte à un même volume, 10 centimètres cubes par exemple, les deux liquides, obtenus comme il a été dit précédemment, et on les introduit dans les récipients. Puis, au moyen de la crémaillère, en élevant ou en abaissant le cylindre plongeur, on donne à la liqueur normale une épaisseur déterminée correspondant à une coloration convenable pour l'œil de l'observateur; ensuite on fait varier de la même manière la hauteur de la colonne de l'autre liquide jus qu'à ce que la teinte de l'autre moitié de champ visuel ait la même intensité de coloration que celle de la liqueur normale.

L'égalité de coloration de chacune des deux parties de champ est produite par une même quantité de matière. On a donc dû, pour l'obtenir, interposer des épaisseurs de liquides inversement proportionnelles à leur teneur en matière colorante. En appelant e l'épaisseur du liquide fourni par l'échantillon type et p sa teneur en carbone, e' et p' l'épaisseur et la teneur en carbone du liquide obtenu avec le métal à examiner, on aura :

$$e' \times p' = e \times p \quad \text{et} \quad p' = \frac{e \times p}{e'}.$$

Les résultats sont exacts, si l'on a soin d'opérer toujours dans des conditions absolument identiques.

Ce procédé permet d'entreprendre simultanément une série assez nombreuse de dosages.

103. Dosage du graphite. — On traite, suivant les cas, un poids de l'échantillon qui peut varier de 1 gramme pour la fonte grise à 10 grammes pour le fer, par de l'acide azotique d'une densité de 1,20. Tout le carbone combiné passe à l'état de combinaisons organiques ; les unes se dissolvent dans la liqueur, tandis que les autres restent sous forme de flocons bruns mélangés au graphite. On recueille ce résidu sur de l'amiante et on le lave à l'eau bouillante. Il est ensuite traité par une solution chaude de potasse, qui lui enlève le carbone resté sous forme de flocons bruns, ainsi qu'un peu de silice. Après un nouveau lavage à l'eau, il est soumis à l'action de l'acide chlorhydrique, qui le débarrasse des dernières traces de potasse, ainsi que de quelques autres matières qu'un simple lavage à l'eau serait impuissant à enlever, et l'on termine, enfin, par un lavage à l'eau chaude.

On obtient ainsi, avec le reste de la silice, un résidu dont la densité, l'éclat, l'aspect semi-cristallin, etc., offrent bien tous les caractères du graphite. Il ne reste plus qu'à le brûler dans un appareil comme celui de la figure 21, et à peser l'acide carbonique produit.

104. Dosage du silicium. — On traite un poids convenable de l'échantillon par l'acide azotique d'une densité de 1,20, que l'on ajoute peu à peu. Quand l'attaque est terminée, on évapore à sec, afin de rendre insoluble l'acide silicique provenant de l'oxydation du silicium. On verse alors sur le résidu de l'acide sulfurique, en quantité suffisante pour que la masse en soit bien imprégnée, puis on ajoute avec précaution de l'acide chlorhydrique.

Sous l'action d'une douce chaleur, les sels de fer se dissolvent. Cette dissolution une fois terminée, on étend d'eau, et la silice est recueillie sur un filtre.

Le poids de la silice obtenue multiplié par le facteur 0,4666 donne le poids de silicium correspondant.

105. Dosage du phosphore. — PREMIÈRE MÉTHODE. — L'oxydation et la dissolution du métal doivent se faire au moyen de l'acide azotique seul. L'eau régale, de même que les autres acides, détermine la formation partielle de composés volatils du phosphore et donne lieu à une perte sensible.

Après avoir dissous un poids connu du métal dans l'acide azotique d'une densité de 1,20, et avoir fait ainsi passer tout le phosphore à l'état d'acide phosphorique, on évapore à sec, puis on reprend, comme il a été indiqué au dosage du silicium, par l'acide sulfurique et l'acide chlorhydrique, et l'on sépare la silice.

La silice séparée, on concentre la solution en l'additionnant d'acide nitrique, et en chauffant jusqu'à ce que tout le chlore soit expulsé; pour s'assurer qu'il en est ainsi, on trempe une baguette de verre dans une solution de nitrate d'argent et on l'expose aux vapeurs dégagées, qui forment du chlorure d'argent tant que tout le chlore n'est pas expulsé. Quand une nouvelle baguette présentée ne blanchit plus, on achève la concentration, de manière à amener la liqueur au plus petit volume; puis, après l'avoir additionnée de sulfate ou de nitrate d'ammoniaque, qui facilitent la précipitation ultérieure, on ajoute une certaine quantité d'une solution molybdique, obtenue en dissolvant 150 grammes de molybdate d'ammoniaque dans 1 litre d'eau et versant cette solution dans 1 litre d'acide azotique.

La quantité de solution employée doit être telle qu'à 1 partie d'acide phosphorique prévue il soit ajouté un minimum de 60 parties de molybdate d'ammoniaque.

On laisse digérer pendant quelques heures à une température de 45 à 50°. Le phosphomolybdate se dépose sous forme d'un précipité dense et grenu, d'une belle couleur jaune clair. On verse ce précipité sur un filtre, et, comme il est légèrement soluble dans l'eau pure et même s'y décompose, on le lave avec de l'eau acidulée par de l'acide nitrique et renfermant, en outre, du nitrate d'ammoniaque et quelque peu de la solution molybdique. Le lavage terminé, on redissout le phosphomolybdate dans l'ammoniaque, et, par l'addition d'un sel ammoniacal de magnésie, on détermine la formation d'un précipité de phosphate ammoniaco-magnésien, qui est recueilli et calciné. Du poids du pyrophosphate de magnésie, obtenu, on déduit le phosphore correspondant, en le multipliant par 0,2793.

Si la silice n'avait pas été préalablement séparée avec soin, il se formerait du silicomolybdate, en même temps que le phosphomolybdate, et le résultat serait erroné.

Ce procédé est d'une exécution délicate et demande un temps assez long ; le procédé suivant joint à l'avantage de fournir des résultats précis celui d'éviter de laborieuses manipulations.

Deuxième méthode. — On dissout un poids donné, 5 grammes par exemple, de l'échantillon dans de l'acide nitrique d'une densité de 1,20 ; cette dissolution se fait dans un ballon à fond plat de 250 centimètres cubes environ ; il suffit de 60 centimètres cubes d'acide, que l'on ajoute peu à peu afin d'éviter qu'une action trop vive n'occasionne un bouillonnement qui fasse déborder le liquide.

Lorsque la dissolution est achevée, on verse la liqueur dans un creuset de platine et on évapore à sec. Élevant ensuite la température de façon à décomposer le nitrate de fer, on obtient un résidu qui renferme, avec la silice, tout le phosphore à l'état de phosphate de fer ultra-basique. A ce résidu, on ajoute 2 à 3 décigrammes de sulfate de soude, et, au moyen de quelques gouttes d'eau, on les incorpore intimement à la masse.

On dessèche d'abord lentement, afin d'éviter les projections, et lorsque toute l'eau est chassée, on recouvre le creuset de son couvercle, puis, au moyen du soufflet d'émailleur on le porte au rouge pendant huit à dix minutes. A cette température, le phosphate de fer réagit sur le sulfate de soude et donne un orthophosphate alcalin et de l'acide sulfurique, qui se volatilise.

Après refroidissement, on traite la matière par de l'eau froide, et, comme le sulfate anhydre de soude est plus soluble à froid qu'à chaud, la masse se désagrège facilement, et la partie soluble peut être dissoute et enlevée avec une quantité minime d'eau.

La liqueur filtrée renferme donc de l'orthophosphate de soude avec l'excès de sulfate de cette même base. Il ne reste plus qu'à y précipiter l'acide phosphorique au moyen d'une solution d'un sel ammoniacal de magnésie ajouté dans la liqueur rendue fortement alcaline par l'addition du cinquième environ de son volume d'ammoniaque liquide.

Après un repos de douze heures, le précipité est recueilli et calciné ; le poids du pyrophosphate obtenu multiplié par 0,2793 donne celui du phosphore correspondant.

106. Dosage du manganèse. — La liqueur qui

a été séparée par filtration de la silice, lors du dosage de ce corps, peut être utilisée pour celui du manganèse.

Pour cela, ainsi qu'il a été indiqué au n° 77, on sépare le fer à l'état d'acétate basique, en ayant soin d'étendre convenablement la liqueur, afin de faciliter ultérieurement le lavage du volumineux précipité d'acétate basique de fer.

Ce procédé donne de bons résultats, mais il est long et d'une exécution délicate. Il paraît préférable d'appliquer au manganèse le procédé colorimétrique.

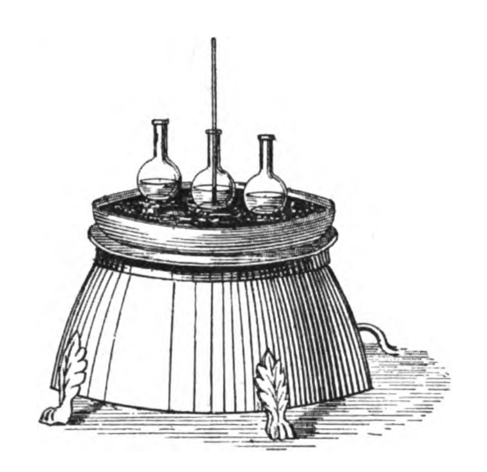


Fig. 25.

On attaque 1 gram. de matière par 50 centimètres cubes d'acide azotique d'une densité de 1,20, et l'on étend la dissolution à 100 centimètres cubes. Sur cette liqueur on prélève, au moyen d'une pipette, 20 centimètres cubes, qui comprennent 0 gr. 2 de matière.

Ces 20 centimètres cubes sont placés dans un ballon en verre mince jaugé de 50 centimètres cubes, et on y ajoute 15 centimètres cubes d'acide azotique fort.

Le ballon est ensuite placé au bain de sable (*fig.* 25), à côté d'un autre ballon semblable renfermant, avec la même quantité d'acide, un poids connu de manganèse à l'état d'azotate ou, mieux encore, une solution faite dans les mêmes conditions d'un même poids d'acier dont la teneur en manganèse est parfaitement déterminée. Enfin,

un troisième ballon, muni d'un thermomètre destiné à indiquer la température, est joint aux deux autres.

Lorsque la température atteint de 85 à 90°, on projette dans chacune des deux solutions nitriques quelques décigrammes de bioxyde de plomb bien pur ou, à son défaut, du minium, en ayant la précaution d'agiter vivement le ballon au moment où se fait cette addition, de manière à répartir rapidement l'oxyde dans la masse entière du liquide.

Dans ces conditions d'acidité et de température, il ne se forme qu'un composé permanganique, qui colore la liqueur en violet rosé.

On laisse refroidir en plongeant les ballons dans l'eau froide, et en évitant de les exposer à l'action directe d'une lumière trop intense.

Quand la température est abaissée, on amène le volume à 50 centimètres cubes, en remplissant les ballons avec de l'eau bien pure jusqu'à la marque indiquée ; puis on laisse déposer, ou l'on filtre sur un tampon d'amiante, de façon à obtenir des liquides bien limpides. On détermine alors sur les deux liqueurs claires, au moyen du colorimètre, les épaisseurs nécessaires pour obtenir l'égalité de teinte. Ce résultat obtenu, comme la quantité de manganèse contenu dans un des liquides est connue, la teneur en manganèse de l'autre est à cette quantité dans le rapport inverse des épaisseurs.

107. Dosage du soufre. — Lorsqu'un fer quelconque est dissous dans un oxydant tel que l'acide azotique, la totalité du soufre qu'il contient est transformée en acide sulfurique, qu'il semble simple de précipiter par un sel de baryte ; mais, en présence d'une aussi grande quantité de sel de fer, l'acide sulfurique n'est plus entièrement précipité par les sels de baryte, et le dosage du

soufre, fait dans ces conditions, ne pourrait conduire qu'à des résultats erronés.

On peut encore dissoudre le métal dans un chlorure, comme il a été indiqué au dosage du carbone, et doser le soufre dans le résidu (n° 100).

Mais, pour la rapidité de l'exécution, il est préférable de traiter le métal par un acide étendu non oxydant, qui donne lieu, avec les produits industriels ordinaires,

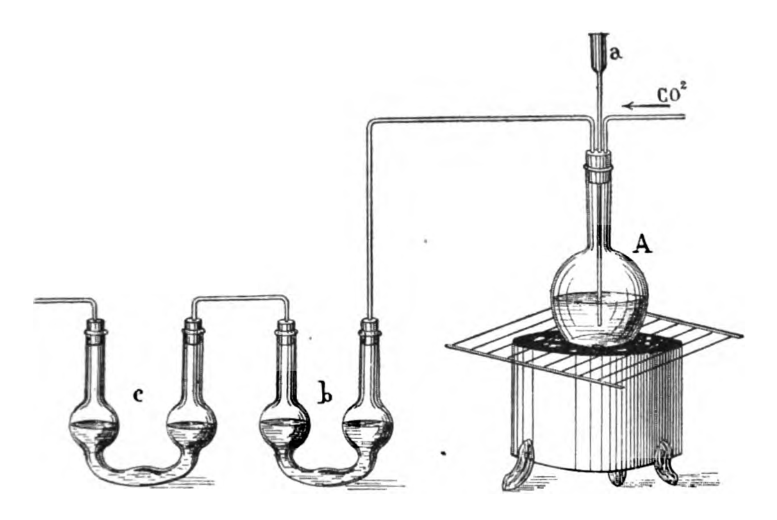


Fig. 26.

à un dégagement total du soufre à l'état de composés gazeux. Ces composés, mis en contact avec une solution de permanganate de potasse, puis avec de l'acide azotique, s'oxydent et abandonnent à ces liquides le soufre à l'état d'acide sulfurique, qu'il ne reste plus qu'à précipiter.

On introduit, dans un petit ballon A (*fig.* 26) de 200 centimètres cubes, de 1 à 10 grammes de métal, suivant la teneur présumée en soufre ; puis, au moyen

d'un appareil à acide carbonique, on fait circuler dans tout l'appareil un courant lent de ce gaz.

Ce dégagement a pour but, en premier lieu, de chasser l'air, qui pourrait occasionner une perte par l'oxydation partielle du soufre, et, en second lieu, d'entraîner les gaz dégagés à la fin de la réaction. Un robinet permet de régler à volonté le courant d'acide carbonique et même au besoin de l'interrompre entièrement.

L'air étant chassé de l'appareil, on verse par le tube à entonnoir *a* de l'acide chlorhydrique étendu de deux fois son volume d'eau.

L'attaque a lieu aussitôt, et les gaz dégagés viennent barboter dans un tube à boules *b* renfermant une solution de permanganate de potasse à 50 grammes de ce sel par litre, puis dans un second tube plus petit *c*, contenant quelques centimètres cubes d'acide azotique faible, destiné à retenir les composés sulfureux autres que l'hydrogène sulfuré qui auraient pu échapper à l'action du permanganate.

Lorsque tout dégagement gazeux a cessé, on chauffe légèrement le ballon, sans toutefois aller jusqu'à l'ébullition, et on en chasse ainsi les dernières traces de gaz.

On réunit la liqueur permanganique à l'acide azotique, on porte ce mélange à l'ébullition et, quand la liqueur est décolorée, on précipite l'acide sulfurique comme à l'ordinaire.

108. Méthode Campdon. — Si l'on voulait, on pourrait employer le procédé indiqué par M. Campdon.

On fait circuler dans l'appareil décrit ci-dessus un mélange d'acide carbonique et d'hydrogène bien pur, et, au moment de l'attaque, on dirige le courant gazeux dans un tube de porcelaine chauffé au rouge. Les composés sul-

fureux qui auraient pu se dégager sous une autre forme se transforment ainsi en hydrogène sulfuré. Faisant ensuite barboter le gaz dans une solution d'acétate de zinc, on retient l'hydrogène sulfuré à l'état de sulfure de zinc. On fait ensuite agir une quantité connue d'iode en excès sur le sulfure de zinc, qui se décompose en iodure de zinc et soufre libre.

On détermine ensuite l'excès d'iode, au moyen d'une solution titrée d'hyposulfite de soude.

A cet effet, on ajoute à la liqueur un peu d'empois d'amidon qui la colore en bleu; puis, on verse, à l'aide d'une burette, la solution titrée d'hyposulfite jusqu'à décoloration.

Du volume employé d'hyposulfite, on déduit la quantité d'iode restée libre et, par différence, celle de l'iode employé à la réaction sur le sulfure de zinc.

Cette réaction se produisant suivant la formule:

$$ZnS + 2I = ZnI^2 + S;$$

on en déduit, par les équivalents, le poids du soufre, en multipliant par 0,1257 celui de l'iode absorbé par le zinc.

§ 3. — Analyse des bronzes et laitons

Les bronzes sont, comme il a déjà été dit, des alliages en proportions variables de cuivre et d'étain. Ils renferment souvent un peu de zinc, de plomb et de fer, et quelquefois du phosphore.

Les laitons, formés de cuivre et de zinc, contiennent un peu de plomb, d'étain et de fer.

On voit donc que la marche générale de l'analyse de ces alliages sera la même dans tous les cas.

109. Préparation des échantillons. — La préparation des échantillons présente quelques difficultés. On ne peut les réduire en poudre à la lime, car cette opération introduirait du fer provenant de cet instrument.

Il faut enlever au ciseau de petites parcelles du métal ou, mieux encore, en réduire une certaine quantité en fins copeaux au moyen d'un tour.

110. Dosage de l'étain. — On en pèse une certaine dose que l'on attaque par l'acide azotique. L'étain est transformé en acide métastannique qui est recueilli sur un filtre; après calcination, on pèse l'acide stannique, et de son poids on déduit celui de l'étain.

111. Dosage du plomb. — La liqueur renfermant les autres métaux à l'état d'azotate est évaporée à sec, avec un petit excès d'acide sulfurique qui déplace l'acide azotique. On reprend par l'eau. Le sulfate de plomb, qui est insoluble, surtout dans les liqueurs renfermant un peu d'acide sulfurique libre, est séparé par filtration, lavé sur le filtre avec de l'eau légèrement sulfurique, puis finalement pesé après calcination; de son poids on déduit celui du plomb.

112. Dosage du cuivre. — Restent le cuivre, le zinc, le fer et peut-être le phosphore. La liqueur étant acide, on y fait passer un courant d'acide sulfhydrique gazeux. Le cuivre seul s'y précipite sous forme de sulfure de cuivre que l'on recueille sur un filtre, où on le lave avec soin au moyen d'eau chargée d'hydrogène sulfuré.

Le précipité, après dessiccation, est calciné avec de la

fleur de soufre dans un creuset taré de porcelaine, et pesé. Du poids du sulfure de cuivre on déduit celui du cuivre métallique.

113. Dosage du fer. — La liqueur qui a été séparée du sulfure de cuivre est saturée par l'ammoniaque ; on détermine ainsi une précipitation de sulfures que l'on achève par l'addition d'un petit excès de sulfhydrate d'ammoniaque.

Les sulfures de zinc et de fer sont recueillis sur un filtre et lavés avec de l'eau chargée d'un peu de sulfhydrate.

On les redissout dans l'acide chlorhydrique dilué. La solution est portée à l'ébullition pour chasser l'acide sulfhydrique qui y est resté. On la retire du feu, puis on y ajoute un peu d'eau régale, ou bien encore quelques cristaux de chlorate de potasse ; une nouvelle ébullition en présence de ces corps détermine l'oxydation du sel de fer qui passe ainsi au maximum. On verse alors un excès d'ammoniaque, qui précipite seulement le peroxyde de fer. On le recueille sur un filtre ; et, comme le précipité retient souvent un peu d'oxyde de zinc, on le redissout sur le filtre et on précipite de nouveau le peroxyde de fer, qui est alors suffisamment pur. Il est recueilli sur un filtre, calciné, et pesé.

La liqueur filtrée est ajoutée à la précédente, afin de ne perdre aucune parcelle de zinc.

114. Dosage du zinc. — Pour avoir le zinc, on concentre préalablement la liqueur et, quand elle est réduite à un petit volume, on l'additionne d'un excès de carbonate de soude et on l'évapore complètement au bain-marie ; de cette façon, l'ammoniaque est entièrement chassée. Il ne reste plus qu'à reprendre par l'eau et à

recueillir le carbonate de zinc. Après avoir bien lavé ce corps, on le calcine, et on pèse l'oxyde formé. D'après son poids, on calcule celui du métal qui y correspond.

115. Dosage du phosphore. — Après qu'on a précipité le fer et le zinc à l'état de sulfures, comme il a été dit au n° 113, la liqueur filtrée renferme encore l'acide phosphorique qui a pu se former par l'oxydation du phosphore au moment de l'attaque.

Cette liqueur est acidifiée, puis concentrée par évaporation. Après avoir séparé par filtration, s'il y a lieu, un peu de soufre provenant de la décomposition du sulfhydrate d'ammoniaque, et avoir rendu la liqueur fortement ammoniacale, on y précipite l'acide phosphorique par l'addition d'une solution d'un sel de magnésie renfermant un excès de sel ammoniacal. Au bout de vingt-quatre heures, on recueille le précipité, on le lave, et du poids obtenu après sa calcination on déduit le phosphore correspondant.

116. Dosage du cuivre et du zinc par l'électrolyse. — Après avoir séparé le plomb, comme il a été dit au n° 111, on peut obtenir le cuivre et le zinc à l'état métallique par l'électrolyse.

On place la liqueur dans une capsule de platine tarée, servant de pôle négatif, et on la recouvre avec un entonnoir dans lequel passe le pôle positif. De cette façon, les faibles quantités de liquide projeté par les petites bulles d'oxygène qui se dégagent de ce pôle retombent dans la capsule.

Pour séparer le cuivre, il est nécessaire qu'il soit obtenu sous forme d'un dépôt bien compact et bien adhérent à la capsule ; il faut pour cela que le travail électro-

lytique du courant, convenablement choisi, soit aussi constant que possible.

La liqueur, peu acide au commencement de l'opération, offre une grande résistance au passage du courant, et le dépôt de cuivre se fait dans de bonnes conditions, mais très lentement, au fond de la capsule. On peut l'activer en chauffant la liqueur à 60 ou 80°. Mais, au fur et à mesure que le cuivre se dépose, l'acidité augmente

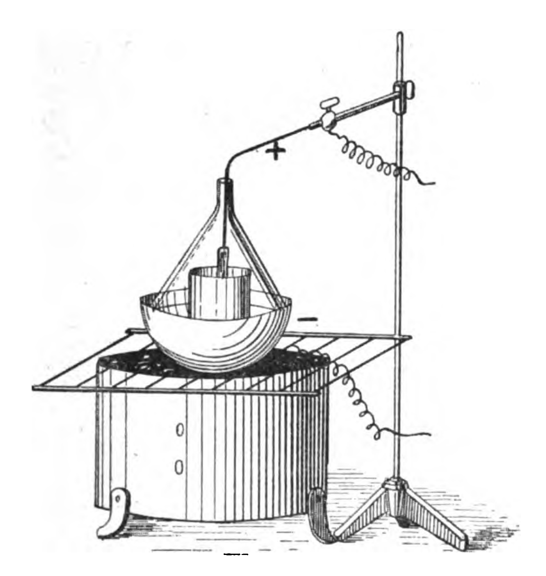


FIG. 27.

par formation d'acide sulfurique, et à cet accroissement de l'acidité correspond une meilleure conductibilité; si l'on continuait de chauffer, le cuivre se déposerait sous forme de mousse sans consistance, ce qu'il faut absolument éviter. Aussi a-t-on soin de diminuer peu à peu le feu, qui cesse complètement vers la fin de l'opération.

On obtient ainsi un dépôt de cuivre brillant et très adhérent.

Lorsque tout le cuivre est précipité, ce dont on s'assure en essayant, au moyen du ferrocyanure de potassium, si une petite quantité de liquide, enlevée au moyen d'un tube fin, ne prend plus la teinte brun rougeâtre caractéristique de la présence des sels de cuivre, on soutire le liquide, sans interrompre le courant, à l'aide d'un tube de verre recourbé formant siphon; on remplace la liqueur par de l'eau distillée, qu'on siphonne et qu'on renouvelle jusqu'à ce que les dernières traces d'acide aient disparu. On enlève la capsule, on la rince à l'alcool, on la sèche à une douce température et on la pèse. Le poids dont elle a augmenté est celui du cuivre.

La liqueur recueillie et les eaux de lavage sont réunies et concentrées dans une autre capsule de platine tarée. Elle sont saturées par la potasse, jusqu'à ce qu'il s'y produise un précipité, qu'on redissout dans le cyanure de potassium.

Sous l'action d'un courant, le zinc se précipite facilement et régulièrement de cette liqueur alcaline, dont la conductibilité reste à peu près constante pendant la durée de l'opération.

Après avoir été lavée comme pour le cuivre, la capsule est pesée, et l'augmentation de son poids donne celui du zinc.

Dans la liqueur séparée du zinc, on peut rechercher et précipiter l'acide phosphorique comme il a été dit plus haut.

CHAPITRE IV

MATÉRIAUX DIVERS

§ 1. — PEINTURES

Les peintures grossières sont faites avec des produits de peu de valeur délayés dans l'eau, ce qui les met à l'abri des falsifications. Pour les rendre adhérentes, l'eau est additionnée de colle de pâte ou de colle de peau ; il n'y a pas d'intérêt à procéder à l'analyse de semblables produits. Si l'on veut reconnaître la nature de la colle employée, on met un peu de la matière dans un tube bouché, on la fait dessécher, puis on la calcine, et l'on constate l'odeur qui se dégage. La peau est caractérisée par une odeur de corne brûlée.

Les peintures à l'huile employées aux enduits des fers, des bois et des murs des édifices sont constituées par des matières minérales délayées dans une huile siccative destinée, par son oxydation à l'air, à donner un vernis résistant propre à les fixer ; de plus, au moment de l'emploi, dans le but de leur communiquer une fluidité convenable, on les additionne d'essence de térébenthine qui, outre ce rôle mécanique, favorise l'oxydation de l'huile.

Les peintures sont exposées à de nombreuses falsifi-

cations. L'huile est fort souvent remplacée, en tout ou en partie par un mélange de résine et d'huile de résine, ou bien encore l'huile siccative est fortement additionnée de résine. Les matières minérales devraient être exclusivement formées des produits qui constituent essentiellement la peinture, savoir: la céruse (hydrocarbonate de plomb), le blanc de zinc (oxyde de zinc), le minium de plomb ou de fer (oxydes salins), et de divers composés colorants. Mais ces produits sont presque toujours additionnés de sulfate de plomb (blanc pesant), de sulfate de baryte (blanc fixe), d'argile, de sable, de plâtre, etc.

Il est, toutefois, bon de remarquer que les ocres, ou argiles ferrugineuses, sont fort souvent employées comme colorants et, dans ce cas, la présence de l'argile ne peut être considérée comme une falsification.

L'analyse d'une peinture comprend donc, d'une part, le dosage des matières combustibles ou volatiles, huile, résine, essence de résine, etc., et, de l'autre, celui des diverses matières minérales.

117. Dosage de l'essence de térébenthine. — On place un échantillon de la peinture à examiner dans un petit ballon taré, que l'on chauffe au bain-marie.

Ce ballon est muni de tubes permettant d'y faire circuler un courant d'acide carbonique, qui, tout en mettant la matière à l'abri de l'air, favorise le départ de l'essence.

Lorsque l'odeur caractéristique de térébenthine est disparue, et que le poids du ballon reste constant, on arrête l'opération. La perte de poids donne la quantité de produits volatils, qui sont à peu près exclusivement de l'essence de térébenthine.

118. Dosage de la résine. — La matière est

ensuite épuisée par le sulfure de carbone, qui lui enlève l'huile, la résine et l'huile de résine. Après avoir chassé le sulfure de carbone par évaporation, on pèse ces matières, puis on les reprend par l'alcool, qui dissout la résine.

Le dosage de la résine, qui est un acide, se fait dans la liqueur où l'on a mis de l'alcool par une solution titrée de potasse. Le poids de la résine équivaut à 5,9 fois le poids de la potasse monohydratée qui produit la saturation.

L'indicateur destiné à colorer la liqueur ne doit pas être la teinture de tournesol, qui n'est pas rougie par la résine. On emploie la phtaléine du phénol.

Il est à remarquer que l'acidité trouvée est trop forte de toute celle propre à l'huile de lin que renferme le mélange, mais l'augmentation qui en résulte est si faible qu'elle peut être négligée, en raison du caractère approximatif du procédé.

119. Dosage de l'huile de lin et de l'huile de résine. — Au moyen d'une pissette renfermant de l'alcool fort, on fait tomber dans un ballon la liqueur précédente en son état, et on y ajoute une quantité de potasse (KHO) exactement connue, telle que son poids soit la moitié environ de la matière, par exemple un volume donné d'une solution alcoolique de potasse renfermant une quantité déterminée de cette substance.

On relie le ballon à un réfrigérant à reflux, et l'on porte à l'ébullition, qui est maintenue pendant une demi-heure ; au bout de ce temps, la saponification de l'huile est terminée. Un nouveau titrage, fait, cette fois, avec une liqueur chlorhydrique, permet de connaître la quantité de potasse absorbée dans cette réaction. Sachant que 1 gramme d'huile de lin exige 192 milligrammes de

potasse pour sa complète saponification, on peut calculer la quantité d'huile correspondant à la potasse absorbée.

Ayant ainsi déterminé, d'une part, le poids des matières solubles dans le sulfure de carbone, et, d'autre part celui de la résine et celui de l'huile de lin, on a, par différence, celui des carbures constituant l'huile de résine.

Les nombres trouvés dans ces divers dosages ne présentent pas la valeur rigoureuse qu'on obtient dans une analyse minérale, mais ils se rapprochent, à quelques centièmes près, des nombres véritables, et, en tous cas, ils fournissent des éléments d'appréciation suffisants pour de pareils produits.

120. Analyse des matières minérales. — Les matières minérales, qui ont été débarrassées des matières grasses par le traitement au sulfure de carbone, sont pesées; puis, elles sont traitées par l'acide azotique dilué, ajouté en petit excès. Si la matière s'y dissout entièrement, ou bien si le résidu insoluble est insignifiant, on peut conclure à l'absence du sulfate de plomb, du sulfate de baryte ou des substances argileuses ou siliceuses. Si, au contraire, le résidu est sensible, on alcoolise légèrement la liqueur pour éviter la dissolution partielle du sulfate de plomb ou du plâtre qui pourrait s'y rencontrer, puis on le recueille sur un filtre où il est lavé avec de l'eau alcoolisée.

L'échantillon se trouve ainsi séparé en deux lots, comprenant l'un les matières insolubles dans l'acide azotique, l'autre les matières solubles.

Premier lot. — Lorsque le lavage est terminé, on met le résidu en digestion dans une solution de carbonate d'ammoniaque; on laisse en contact pendant quelques

heures, en ayant soin d'agiter fréquemment; puis, on filtre. Dans la liqueur filtrée se trouve l'acide sulfurique provenant de la décomposition du sulfate de plomb et du sulfate de chaux. On acidifie cette liqueur, et on y dose l'acide sulfurique d'après la méthode ordinaire.

Le résidu resté sur le filtre est de nouveau traité par l'acide azotique, qui dissout le plomb et la chaux. On précipite le plomb par un courant d'hydrogène sulfuré, on recueille ce sulfure, on l'oxyde comme il sera dit pour le traitement du deuxième lot et on le pèse à l'état de sulfate. Dans la liqueur d'où il a été séparé, on précipite la chaux par l'oxalate d'ammoniaque, et on la dose comme à l'ordinaire. On a ainsi déterminé le plomb et la chaux qui sont à l'état de sulfates, et l'acide sulfurique provenant de ces deux corps.

S'il reste quelque chose sur le filtre, après ce second traitement par l'acide azotique, on le pèse, puis on le fond avec le double de son poids de carbonate de soude; s'il s'y trouve du sulfate de baryte, ce corps est ramené à l'état de carbonate insoluble, qu'on lave avec une eau tenant en solution un peu de carbonate alcalin. Le lavage terminé, ou dissout le carbonate de baryte dans un acide, on évapore à sec, on sépare la silice, s'il y a lieu, et on précipite la baryte par l'acide sulfurique ; le sulfate de baryte pesé, on a, par différence, les matières argileuses, ou bien encore on continue l'analyse suivant la méthode indiquée pour les silicates (n° 89).

Deuxième lot. — La liqueur alcoolisée, qui renferme les matières solubles dans l'acide azotique, est portée à l'ébullition pour chasser l'alcool. On laisse ensuite refroidir la liqueur, et on y fait passer un courant d'hydrogène sulfuré, qui précipite le plomb à l'état de sulfure.

Ce sulfure de plomb, recueilli sur un filtre, y est lavé

et séché ; puis, on le fait tomber dans une capsule de porcelaine, où, après y avoir joint les cendres du filtre, on le traite par l'acide azotique concentré. Sous l'action de cet oxydant, dont on facilite l'attaque par quelques gouttes d'acide sulfurique, il se transforme en sulfate de plomb, que l'on reçoit sur un filtre.

On le lave avec de l'eau aiguisée d'acide sulfurique, dans laquelle il est complètement insoluble.

Après dessiccation, on le sépare du filtre, on le place dans une petite capsule tarée, on y joint les cendres du filtre et on le calcine légèrement ; de son poids, on déduit la quantité d'oxyde de plomb provenant de la céruse.

La liqueur, séparée du sulfure de plomb, est additionnée d'un excès d'acétate de soude, qui donne, avec les acides forts, des sels de soude et de l'acide acétique en liberté; cet acide n'empêchant pas la précipitation du zinc par l'hydrogène sulfuré, on soumet de nouveau le liquide à l'action de ce gaz.

Le zinc se précipite à l'état de sulfure blanc souvent teinté de gris par un peu de sulfure de fer, dont la dose est, d'ailleurs, négligeable.

On rassemble ce sulfure de zinc sur un filtre, et, lorsqu'il est lavé et séché. on le grille sous le moufle afin de le transformer en oxyde dont on détermine le poids.

Si la quantité de sulfure est forte, le grillage en devient difficile ; il est alors préférable, après l'avoir lavé, de le redissoudre dans l'acide chlorhydrique; on sature la liqueur par l'addition de carbonate de soude ajouté peu à peu, puis on y précipite le zinc à l'état de carbonate.

Il faut avoir soin d'éviter l'emploi d'un grand excès du précipitant, qui rendrait le lavage très laborieux. En second lieu, il faut porter et maintenir le liquide à l'ébullition un certain temps, afin de chasser entièrement

l'acide carbonique mis en liberté pendant la saturation, qui retiendrait en dissolution un peu de carbonate de zinc; en outre, pendant cette ébullition, le précipité devient grenu et peut être facilement recueilli et lavé. Lorsqu'il est sec, on le place dans un creuset de platine, ainsi que les cendres du filtre qui le contenait, et par calcination on obtient de l'oxyde de zinc.

Dans la liqueur séparée du zinc, il ne reste plus qu'à doser la chaux et la magnésie, ce qui a lieu suivant la méthode connue.

Enfin, l'analyse peut être complétée par un dosage de l'acide carbonique et par une perte au feu (n° 83).

§ 2. — Asphaltes et bitumes

Le bitume est un hydrocarbure, solide à la température ordinaire et fusible par la chaleur. On le trouve quelquefois en liberté; le plus souvent, il imprègne des sables siliceux, des terres argileuses ou des grès.

L'asphalte est un calcaire naturel formé de grains pulvérulents agglomérés par du bitume.

La proportion de bitume est très variable dans les asphaltes. Lorsqu'elle est insuffisante pour les applications que l'on en veut faire, on l'enrichit en y ajoutant du bitume extrait des terres qui en sont imprégnées.

On fabrique aussi des asphaltes artificiels en mélangeant des calcaires broyés avec des résidus industriels ayant des caractères analogues à ceux du bitume, notamment avec du brai de gaz.

Certains asphaltes renferment des pyrites, qui semblent

avoir une influence fâcheuse sur la conservation des ouvrages, notamment des chaussées.

121. Marche de l'analyse. — L'analyse de tous les produits bitumineux se fait en dissolvant le bitume dans la benzine ou, mieux encore, dans le sulfure de carbone.

On réduit l'échantillon en petits fragments, ce qui est quelquefois assez difficile pour certains produits qui s'agglomèrent facilement. On est alors obligé de les couper au couteau.

On introduit un poids déterminé de ces fragments dans une fiole, et on les recouvre de sulfure de carbone; après avoir bien agité le mélange, on laisse déposer les matières insolubles, puis on décante sur un filtre en évitant, autant que possible, d'y verser les matières insolubles qui sont souvent difficiles à retenir sur le filtre. Quand la matière est épuisée, on recueille le sulfure de carbone dans une capsule tarée, que l'on place sur un bain-marie rempli d'eau chaude, mais éloigné de tout foyer en activité qui pourrait, même à distance, enflammer les vapeurs de sulfure de carbone. Ce dissolvant s'évapore facilement, et le bitume reste dans la capsule, où on le pèse.

Comme le filtre peut avoir laissé passer quelques matières minérales, il est bon de calciner le bitume et de peser le résidu. On le retranche de la pesée pour avoir le poids exact du bitume, et on l'ajoute ensuite au poids des matières insolubles dans le sulfure de carbone.

Dans les produits de bonne qualité, ces matières sont blanches ou légèrement pointillées de gris; mais si le produit a été mal préparé, ou bien encore si l'on y a introduit du brai de gaz, il renferme des matières char-

bonneuses, et sa couleur est plus ou moins foncée.

Le résidu insoluble est ensuite placé dans un appareil à doser l'acide carbonique. Lorsque cette détermination est effectuée, on se sert de la liqueur pour continuer l'analyse, comme dans le cas d'un calcaire, en ayant soin de peser le résidu insoluble dans l'acide, d'abord après dessiccation à 100°, et ensuite après calcination, afin de déterminer, s'il y a lieu, par différence, la quantité de matières charbonneuses combustibles.

Il convient, enfin, de rechercher et de doser les pyrites dans le résidu insoluble, quand un examen à la loupe en a décélé ou fait présumer la présence. On traite alors le résidu comme il a été indiqué au n° 81.

On complète l'analyse en déterminant les matières volatiles à 100° dans une étuve, sur une prise spéciale d'échantillon.

122. Recherche du brai de gaz. — Le brai sec, provenant des usines à gaz se distingue du bitume naturel par la coloration qu'il donne à l'alcool, ainsi qu'à l'essence de térébenthine et à quelques autres dissolvants.

On réduit en poudre le résidu extrait au moyen du sulfure de carbone, après l'avoir complètement desséché. Cette poudre est mise à digérer avec de l'alcool concentré. L'alcool reste incolore ou prend une légère teinte ambrée, lorsqu'il s'agit de bitume naturel, tandis qu'il devient jaune d'or et prend un aspect fluorescent avec le brai de gaz.

Mais il arrive aussi que certains produits naturels sont additionnés de brai de gaz. Dans le but d'en apprécier la quantité, M. Durand-Claye a proposé le procédé suivant:

Le résidu soluble dans le sulfure de carbone est, après volatilisation de ce véhicule, chauffé jusqu'à ce qu'il

devienne, par le refroidissement, dur et cassant comme le brai; il est alors pulvérisé, et on opère sur la poudre obtenue.

On pèse 1 décigramme de cette poudre et on la place dans un tube bouché. On ajoute 5 centimètres cubes d'acide sulfurique monohydraté. On ferme le tube avec un bouchon et on laisse digérer pendant vingt-quatre heures environ.

On débouche et on étend de 10 centimètres cubes d'eau.

Cette dernière opération doit être faite avec la plus grande précaution à cause de la chaleur qui se développe pendant le mélange; outre le danger de faire casser le tube, cet échauffement excessif ferait échouer la réaction. A cet effet, on place le tube dans un verre rempli d'eau froide et l'on ajoute les 10 centimètres cubes d'eau avec une pipette, à plusieurs reprises, en la laissant couler peu à peu le long des parois du tube, puis on agite doucement avec une baguette de verre, en laissant un long intervalle, un quart d'heure par exemple, entre les reprises successives.

Quand le mélange est terminé, on le jette sur un petit filtre placé sur un entonnoir, au-dessus d'une fiole de 150 à 200 centimètres cubes de capacité.

Quand toute la liqueur a passé, ce qui est quelquefois assez long, on lave avec de l'eau froide jusqu'à ce qu'on ait versé 100 centimètres cubes d'eau de lavage.

La liqueur ainsi obtenue est incolore ou à peine colorée, lorsqu'on a opéré sur des bitumes naturels. Elle est, au contraire, d'un brun foncé, si l'on a employé le brai de gaz. Si l'on opère sur des mélanges, on obtient des nuances intermédiaires. L'intensité de ces nuances peut servir à doser approximativement les mélanges, si l'on a soin de se tenir toujours dans les mêmes condi-

tions. Il suffit de les comparer à celles que donnent des mélanges de composition connue. Le colorimètre peut être utilisé pour cet objet.

§ 3. — Combustibles minéraux

Les combustibles minéraux sont essentiellement formés de carbone, auquel sont toujours associés, en proportion variable, de l'hydrogène et de l'oxygène. En outre, ils contiennent des matières minérales fixes qui constituent les cendres. Enfin, il s'y trouve souvent du soufre, notamment à l'état de pyrite, qui se volatilise au moins en partie dans la combustion, et toujours un peu d'humidité provenant de l'eau de carrière ou des intempéries.

La proportion des gaz volatils, de l'eau et des matières minérales influe sur le pouvoir calorifique des combustibles. La quantité et la nature des cendres peuvent motiver des dispositions particulières dans les appareils industriels de chauffage; le soufre qui se dégage pendant la combustion présente des inconvénients dans bien des cas.

L'analyse industrielle d'un combustible comporte donc le dosage de l'humidité, des cendres, du soufre à ses différents états, et la détermination du pouvoir calorifique.

123. Dosage de l'eau. — L'échantillon, réduit en poudre grossière, est desséché à l'étuve de 100 à 110° ; cependant, pour certaines houilles riches en matières

volatiles, il est bon de ne pas élever la température au-dessus de 100° et d'éviter, autant que possible, l'accès de l'air. La perte de poids donne l'eau.

124. Analyse des cendres. — On dose les cendres, en brûlant au moufle quelques grammes de l'échantillon placé dans une capsule de porcelaine ; on recueille les cendres obtenues et on les pèse.

Ces cendres sont généralement formées de sable, d'oxyde de fer et d'argile plus ou moins calcaire.

L'analyse s'en fait comme celle des chaux et ciments.

Souvent on se contente de la pesée, et l'on estime la qualité des cendres d'après leur coloration.

Lorsque l'oxyde de fer y est en minime quantité, elles sont blanches et, dans ce cas, elles sont presque toujours difficilement fusibles ; lorsque la teneur en oxyde de fer s'élève, la coloration passe du blanc au rose, pour aller jusqu'au brun foncé, et elles deviennent en même temps de plus en plus fusibles.

La coloration des cendres permet donc, jusqu'à un certain point, d'apprécier leur fusibilité et, par conséquent, la facilité à brûler que présentent les combustibles qui les produisent.

En effet, les cendres blanches pulvérulentes se séparent facilement ; celles d'un brun foncé, très fusibles, coulent sous la grille du foyer ; tandis que les cendres rosées, demi-fusibles, donnent des mâchefers qui empâtent la grille, arrêtent l'accès de l'air et empêchent la combustion.

125. Dosage du soufre. — Dans les combustibles, le soufre se rencontre en majeure partie à l'état

de pyrite ; mais il s'y trouve aussi sous forme de matière organique, ainsi que sous celle de sulfate de chaux. Ce dernier corps est sans grand inconvénient, tandis que les pyrites et la matière organique sulfurée dégagent, par la combution, des odeurs suffocantes et des produits acides qui corrodent les appareils de chauffage.

Pour doser le sulfate de chaux, on détermine la quantité de l'acide sulfurique préexistant. On traite un poids connu de l'échantillon par de l'eau fortement acidulée par l'acide chlorhydrique. On porte à l'ébullition, on laisse refroidir, on filtre, et, après s'être assuré que la matière ne cède plus d'acide sulfurique à l'eau acidulée, on précipite cet acide à l'état de sel de baryte, comme à l'ordinaire.

Pour connaître le soufre total, on chauffe dans un creuset de platine un mélange intime de 1 partie en poids du charbon à examiner avec 1 partie de magnésie calcinée et 1/2 partie de carbonate de soude pur et sec. On maintient au rouge pendant une heure environ, en facilitant autant que possible l'accès de l'air et en malaxant fréquemment le mélange avec une petite spatule de platine. Au bout de ce temps, la totalité ou tout au moins la plus grande partie du carbone est brûlée. On abandonne la masse au refroidissement, pour la reprendre ensuite par la quantité d'eau chaude nécessaire à sa désagrégation ; lorsque celle-ci est complète, on ajoute de l'eau bromée pour oxyder les sulfures qui ont échappé à l'action de l'air, et on amène ainsi tout le soufre à l'état de sulfate.

On débarrasse la liqueur de l'excès de carbonate de soude en l'acidifiant par l'acide chlorhydrique, puis de l'excès de brome en la portant à l'ébullition. Cette dernière opération terminée, on filtre et, dans la liqueur

claire, on précipite l'acide sulfurique suivant la méthode connue.

La différence entre le poids total du soufre et celui qui a été trouvé à l'état de sulfate de chaux donne le poids du soufre des pyrites et des composés organiques.

126. Pouvoir calorifique. — La détermination du pouvoir calorifique se fait encore quelquefois d'après le procédé indiqué par Berthier, et qui consiste à chauffer 1 gramme de l'échantillon avec un excès de litharge. Le poids du culot métallique obtenu était considéré comme proportionnel au pouvoir calorifique, la quantité d'oxygène nécessaire à la combustion y étant elle-même supposée proportionnelle.

Mais il a été reconnu que cette hypothèse n'était pas exacte, et cette méthode donne un simple aperçu et non un véritable dosage.

D'autres procédés ont été tour à tour proposés, mais ils reposent presque tous sur des déterminations calorifiques faites dans des conditions défectueuses, et ils ne présentent guère plus de garanties que le procédé Berthier.

On doit à M. Berthelot la solution du problème par la création de la bombe calorimétrique.

Cet appareil permet, par un artifice convenable, l'inflammation d'un corps dans une enceinte exactement fermée renfermant de l'oxygène sous pression. On obtient ainsi la combustion rapide et complète du combustible que l'on veut essayer.

La bombe placée dans l'eau du calorimètre lui cède sans déperdition sensible la chaleur dégagée, dont on peut observer la valeur en calories à l'aide d'un thermomètre ; lorsqu'on veut une précision absolue, il reste seulement à opérer quelques corrections peu importantes.

Pour l'examen des combustibles, M. Mahler a apporté à la bombe calorimétrique différentes modifications qui, dans ce cas spécial, rendent l'appareil d'un emploi plus commode, tout en fournissant des résultats suffisamment exacts.

L'appareil ainsi modifié (*fig.* 28) se compose essentielle-

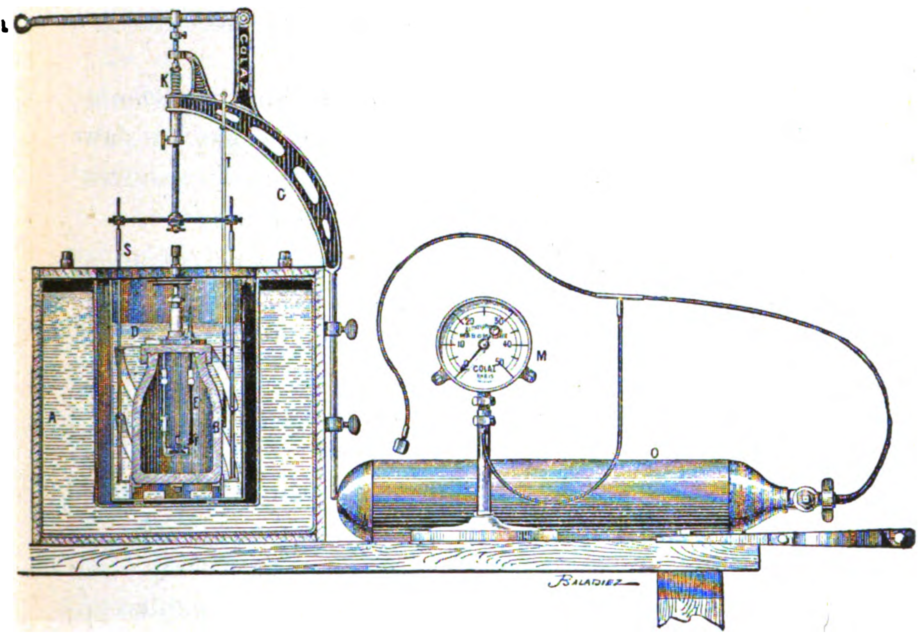


Fig. 28.

ment d'un obus B en acier forgé sur mandrin, suffisamment résistant pour supporter sans danger une pression de 50 atmosphères.

L'intérieur de l'obus, d'une capacité de 650 centimètres cubes environ, est revêtu d'une couche d'émail destinée à le préserver contre l'action corrosive des acides azotique et sulfurique qui se forment toujours pendant la combustion.

La fermeture s'obtient par un couvercle en fer à vis D qui, par serrage, vient écraser une couronne de plomb engagée dans une rainure et assure ainsi l'étanchéité de la fermeture.

Ce couvercle porte un robinet pointeau qui permet l'introduction de l'oxygène ; il est, en outre, muni de deux électrodes en platine E, dont l'une sert de support à la capsule de platine destinée à recevoir le combustible à essayer.

Ces deux électrodes sont, au moment de l'expérience, réunies entre elles par un petit fil de fer F passant dans le combustible et destiné, sous l'influence d'un courant électrique, à servir d'amorce à l'inflammation.

L'obus est placé dans un calorimètre en cuivre mince qui peut contenir environ 2 litres d'eau, que l'on peut facilement brasser au moyen d'un agitateur hélicoïdal. Enfin l'enceinte extérieure, qui peut contenir 15 litres d'eau, est protégée par une garniture de feutre qui en assure l'isolement.

Un thermomètre T plongé dans le calorimètre sert à observer la température, à 1/2 dixième de degré près.

On prend un poids donné, 1 gramme par exemple, du combustible à essayer, et on le place dans la petite capsule de platine; on joint les deux électrodes par le fil de fer qu'on a exactement pesé, en ayant soin qu'il soit bien en contact avec le combustible. On referme l'obus qu'on met ensuite en communication avec un réservoir O d'oxygène sous pression.

On ouvre le robinet avec précaution, de façon que le remplissage se fasse lentement, afin d'éviter qu'une brusque introduction du gaz ne chasse une partie de la matière contenue dans la capsule. On surveille, d'ailleurs, le remplissage à l'aide d'un manomètre M. Lorsque la

pression est arrivée à 25 atmosphères, on ferme le robinet.

L'obus ainsi préparé, on le place dans le calorimètre, que l'on remplit avec une quantité d'eau exactement connue (2 litres à 2 1/2 suivant les instruments). On met l'agitateur en mouvement, et l'on observe le thermomètre. La température s'abaisse d'abord. Quand elle est devenue stationnaire, ce qui a lieu environ après cinq minutes, on met les électrodes en contact avec les pôles d'un courant qui rougit le fil de fer. La combustion a lieu aussitôt presque instantanément.

Continuant à mouvoir l'agitateur, on observe le thermomètre, qui monte d'abord tant que l'eau s'échauffe, puis redescend quand elle se refroidit. On note le degré atteint au maximum. La différence avec le degré initial indique la quantité de calories cédées au calorimètre par la combustion. Il suffit de multiplier cette différence par le volume de l'eau mise dans le calorimètre, augmenté de l'équivalent calorifique en eau de l'obus et de ses accessoires.

Soit par exemple 2°,78 l'élévation de température observée ; si l'on suppose que le poids de l'eau du calorimètre soit 2.200 grammes, et que l'équivalent en eau de l'obus et de ses accessoires soit de 480 grammes, la quantité de chaleur dégagée sera:

$$(2.200 + 480)\,2{,}78 = 7 \text{ cal. } 45.$$

Ce chiffre est un peu trop élevé, d'une part parce que la combustion du fil de fer qui a produit l'inflammation a fourni de la chaleur, d'autre part parce qu'il s'est formé de l'acide azotique et de l'acide sulfurique par la combinaison avec l'oxygène de l'azote et du soufre contenus dans le combustible, et que cette action chimique a développé de la chaleur.

L'influence de la combustion du fer peut être calculée, si on a pesé le fil employé, dont le coefficient calorifique est 1,6. Par exemple, un fil de fer de 0 gr. 25 fournira 0 cal. 04, qui devront être retranchées du résultat brut.

Quant à la chaleur dégagée par la formation des acides, on la détermine de la manière suivante: On ouvre avec précaution l'obus, et on le rince avec de l'eau distillée. Dans la liqueur recueillie par filtration, on dose le degré d'acidité par une solution titrée de potasse. Comme l'acide sulfurique est toujours relativement en petite quantité, on attribue la totalité de cette acidité à de l'acide azotique, et on multiplie par 0,23 le poids d'acide azotique qui correspond au degré d'acidité. On obtient ainsi la seconde quantité à retrancher du nombre brut.

Le résultat ainsi obtenu est suffisant pour une analyse courante. Si l'on voulait une très grande précision, il faudrait compenser en partie les corrections par d'autres petites corrections en sens contraire, pour tenir compte des causes d'erreur suivantes :

1° Au moment de son installation dans le calorimètre, l'obus, légèrement échauffé par l'injection de l'oxygène et par les manipulations répétées qu'il a subies, est à une température plus élevée que les milieux ambiants, en sorte que, sous l'influence de l'obus seul, l'eau du calorimètre s'échauffe ; puis, le thermomètre baisse progressivement par suite du rayonnement. Ce refroidissement est très lent, et on ne peut attendre que l'équilibre soit entièrement rétabli ; on met le feu après cinq minutes. Il y aurait à tenir compte de la chaleur qui reste encore en excès au moment de la mise en feu ;

2° Quelque courte que soit l'expérience, le calorimètre rayonne toujours un peu, et il faudrait également tenir compte de la perte due au rayonnement pendant le temps

que le thermomètre emploie à atteindre le maximum.

On peut, dans une certaine mesure, calculer ces corrections, en se basant sur des données empiriques fournies par des observations faites sur des corps dont le pouvoir calorifique est parfaitement déterminé. Il suffit, pour cela, de noter les indications du thermomètre à des intervalles réguliers, d'une demi-minute par exemple, avant et après la mise en feu. Mais l'exposé de cette méthode sortirait du cadre du présent ouvrage.

En pratique, on se contente des corrections relatives à la combustion du fer et à la formation des acides.

CHAPITRE V

EAUX NATURELLES, TERRES, AMENDEMENTS ENGRAIS ET PRODUITS AGRICOLES

§ 1. — Eaux naturelles

127. Origine des eaux. — Toutes les eaux qui coulent à la surface de la terre proviennent de l'immense réservoir formé par la mer. On sait que l'évaporation enlève à la surface des eaux une couche évaluée, en moyenne, à 3 ou 4 millimètres d'épaisseur par jour. La superficie des mers étant d'au moins les deux tiers de celle du globe, il en résulte que le volume d'eau vaporisée est de plus de 1.000 kilomètres cubes par jour.

Cette énorme masse s'élève sous forme de vapeur pure. C'est le produit d'une distillation semblable à celle qui a lieu dans l'alambic. Elle se dissout dans l'air, qui s'en sature plus ou moins, et est emportée par les vents. Puis, quand elle parvient dans des régions froides, elle se condense, comme l'eau distillée dans le réfrigérant de l'alambic, et elle forme les nuages d'abord, puis la pluie. La pluie est donc de l'eau de mer distillée.

Les deux tiers environ de cette eau retombent dans la mer, et le reste arrive au sol sous forme de pluie, ou se condense en neige au sommet des montagnes et dans

les latitudes très froides, où les élévations de température en liquéfient une partie de temps en temps.

Une fois arrivée au sol, l'eau se partage en deux portions : l'une court à la surface et se rend directement aux ruisseaux, aux rivières et aux fleuves ; l'autre s'imbibe dans les terrains perméables et pénètre à l'intérieur, où elle forme les nappes souterraines. Ces nappes, qui reposent sur des bancs imperméables et en suivent les pentes, sont animées d'un courant plus ou moins sensible, qui les amène parfois à émerger sous forme de sources lorsque le banc imperméable vient affleurer la surface.

Enfin, les fleuves reconduisent toute cette eau condensée à la mer, d'où elle était sortie, et dont le niveau se trouve maintenu ainsi absolument constant.

128. Composition de l'eau de pluie. — L'eau de pluie, en tombant des nuages sur le sol, traverse l'atmosphère et s'y charge des matières solubles qu'elle y rencontre. Ces matières sont : les gaz de l'air, oxygène, azote et acide carbonique ; un peu d'ammoniaque, provenant de la décomposition des matières organiques ; un peu d'acide nitrique, produit par l'action des étincelles électriques des régions nuageuses sur le mélange d'oxygène et d'azote, enfin des traces souvent à peine sensibles de sels minéraux, fournis par les poussières que les vents soulèvent à la surface de la terre ou sur la crête des vagues.

Cette absence presque complète de matières solides dans l'eau de pluie permet de l'employer souvent en guise d'eau distillée.

Les trois gaz de l'atmosphère se retrouvent dans l'eau de pluie, mais en proportions différentes. L'eau dissout

seulement 1/62 de son volume d'azote, tandis qu'elle se charge de 1/27 de son volume en oxygène et d'un volume égal au sien en acide carbonique. Aussi l'air dissous dans l'eau est-il bien plus riche en acide carbonique et plus pauvre en azote que l'air atmosphérique.

On a trouvé que de l'eau bien aérée renfermait environ 1/20 de son volume de gaz ramené par le calcul à la température 0° et à la pression de 0m,760 de mercure, dont la composition s'écarte peu des moyennes suivantes :

Oxygène....................	32	pour 100
Acide carbonique............	3	—
Azote......................	65	—

La quantité d'ammoniaque trouvée dans l'eau de pluie est des plus variables. Elle augmente aux abords des villes, où abondent les foyers de putréfaction ; elle est plus grande dans une pluie faible, venant à la suite d'une longue sécheresse, que dans une pluie abondante ou succédant à une ondée antérieure. M. Boussingault a trouvé, en rase campagne, une moyenne de 0 gr. 75 d'ammoniaque par mètre cube d'eau tombée. Dans les villes, on en a constaté beaucoup plus : 3 grammes en moyenne à Paris et à Marseille, et jusqu'à 7 grammes à Lyon.

L'acide nitrique se trouve surtout dans les pluies d'orage. On en a dosé jusqu'à 6 grammes par mètre cube dans certaines pluies. Il se rencontre également dans les rosées, les brouillards, les neiges. Mais la moyenne des expériences de M. Boussingault, en rase campagne, ne dépasse pas 0 gr. 18 par mètre cube d'eau.

129. Composition des eaux courantes et de puits. — Les eaux courantes, celles des sources et des puits, sont formées d'eau de pluie qui est restée en con-

tact plus ou moins prolongé avec le sol. Elles renferment donc les mêmes éléments et, en outre, des éléments pris au sol.

On y trouve par conséquent les mêmes gaz, oxygène, azote et acide carbonique, puis de l'acide nitrique et de l'ammoniaque. Mais, comme l'argile a la propriété d'absorber et de retenir les sels ammoniacaux, et que, d'autre part, une partie de l'ammoniaque se nitrifie dans le sol, cet élément s'y rencontre en moins grande dose que dans la pluie. Ainsi, la moyenne des analyses faites sur divers cours d'eau n'a donné que 0 gr. 17 d'ammoniaque par mètre cube d'eau courante, et descend même à 0 gr. 01 pour les sources. Quant à l'acide carbonique, sa dose est en général augmentée par le contact du sol.

Les éléments empruntés au sol sont: quelques matières organiques, en dose variable, suivant l'état du sol traversé ; puis des matières minérales formées soit de sels solubles, tels que des chlorures et les sulfates, soit de sels terreux dissous à la faveur de l'acide carbonique de l'eau sous forme de bicarbonates. Elles dépassent rarement un petit nombre de décigrammes par litre.

Ainsi on a trouvé dans:

La Loire	135	grammes	de matières fixes	par mètre cube.
La Garonne ...	135	—	—	—
Le Rhône	184	—	—	—
Le Rhin.......	171	—	—	—
La Seine......	211	—	—	—
L'Escaut	292	—	—	—

On aura une idée de la composition de ces résidus par la moyenne des résultats d'analyses faites, pendant trois ans, jour par jour, au laboratoire de l'École des Ponts et

chaussées, sur l'eau de la Seine prise à l'amont de Paris :

		gr.	gr.
Matières organiques par mètre cube d'eau			13,1
Matières minérales par mètre cube d'eau.	Silice	6,6	197,7
	Peroxyde de fer et alumine.	1,2	
	Chaux	92,5	
	Magnésie	6,0	
	Alcalis	8,7	
	Chlore	4,3	
	Acide sulfurique	10,8	
	Acide carbonique, etc.	67,6	
Résidu total par mètre cube			210,8

Les eaux des puits ont souvent la même composition que les eaux des sources. Mais quelquefois elles sont beaucoup plus chargées de matières fixes, lorsqu'elles proviennent de nappes sans écoulement ou d'un écoulement très lent, surtout au milieu de terrains gypseux. C'est ce qui arrive notamment à Paris, où les eaux de puits donnent souvent des résidus de près de 2 grammes par litre, composés en majeure partie de sulfate de chaux.

Les puits étant placés en général à proximité des habitations, près de fosses à fumier ou d'aisances mal étanchées, leurs eaux renferment souvent une dose relativement élevée de matières organiques, d'ammoniaque et d'acide nitrique.

Les cours d'eau tiennent, en outre, en suspension des matières non dissoutes, nommées troubles ou limons, dont les colmatages tirent parti.

La quantité de limon entraînée est très variable d'un moment à l'autre sur un même cours d'eau, ou bien d'un cours d'eau à un autre. Elle augmente avec les crues, qui donnent de la vitesse au courant et favorisent les

corrosions des rives. Aussi les cours d'eau torrentiels fournissent-ils beaucoup plus de limon que les rivières tranquilles. C'est ainsi que la Durance, en 1860, année il est vrai très humide, a porté au Rhône 18.000.000 de tonnes de limon, tandis que la Seine, quoique ayant un débit beaucoup plus considérable, n'en entraîne en moyenne que 200.000 tonnes par an.

Dans une période de sécheresse, comprenant les années 1869 et 1870, le Rhône, près de son embouchure, a débité en moyenne 7.400.000 tonnes de limon, ce qui est beaucoup moins que la Durance seule en 1860. La composition moyenne de ces limons du Rhône a été :

Résidu argileux insoluble dans les acides	48,60
Alumine et peroxyde de fer	9,95
Carbonate de chaux	31,84
Azote	0,14
Autres matières organiques et produits non dosés	9,47
TOTAL	100,00

130. Composition de l'eau de la mer. — L'eau de la mer est un extrait des eaux courantes, qui y apportent continuellement des sels, et s'y concentrent par évaporation. Cependant, la composition des sels de la mer est très différente de celle des matières trouvées dans les eaux courantes. Dans celles-ci, c'est la chaux qui domine ; dans la mer, ce sont les alcalis. On y trouve des chlorures et des sulfates au lieu de carbonates. Cela tient au monde d'êtres organisés qui vivent au fond de la mer, et s'y assimilent certains éléments de préférence à d'autres. C'est ainsi que le carbonate de chaux est absorbé presque en entier par les madrépores et les coquillages.

Le chlorure de sodium forme les 3/4 environ des sels

renfermés dans l'eau de mer. Le dernier quart se compose de chlorhydrates et de sulfates de soude, de magnésie et de chaux, avec un peu de potasse et quelques traces de brome. La composition de ces sels peut se grouper comme suit :

Chlorure de sodium	76,5
— de potassium	2,0
— de magnésium	10,2
Sulfate de magnésie	6,5
— de chaux	4,0
Produits divers	0,8
TOTAL	100,0

Quant au poids total des sels tenus en dissolution par l'eau de mer, il est en moyenne de 35 kilogrammes par mètre cube ; mais il varie d'un point à un autre. La salure augmente dans les mers où l'évaporation est plus rapide que l'apport d'eau douce des fleuves. Elle diminue dans les circonstances contraires, près de l'embouchure des grands fleuves et près des glaces polaires, dont la fusion fournit de l'eau douce ; elle est faible dans certaines mers intérieures encore peu concentrées.

Voici les nombres donnés par différents auteurs :

La mer Méditerranée contient	44	kilog. de sels par mètre cube.
L'océan Atlantique	36	—
La Manche	35	—
La mer du Nord	30	—
La mer Noire	18	—
La mer d'Azof	12	—
La mer Baltique	7,5	—
La mer Caspienne	6	—

Certaines parties du canal de Suez renferment plus de 70 kilogrammes de sels par mètre cube, et on en trouve

dans la mer Morte, suivant les saisons, de 150 à 450 kilogrammes.

131. Eaux diverses. — En dehors des eaux qui viennent d'être énumérées, on rencontre dans la nature des eaux qui jouissent de caractères particuliers, comme les eaux minérales, dont il n'y a pas à s'occuper ici, et les eaux incrustantes, qu'il suffit de mentionner.

Les ingénieurs ont quelquefois à étudier, en outre, diverses eaux industrielles déversées par les usines, au point de vue soit de leur utilisation pour l'agriculture, soit des inconvénients qu'elle peuvent présenter pour les cours d'eau où elles se déchargent. Il est impossible de donner ici aucune indication sur la nature de ces eaux, qui varient évidemment dans chaque cas en raison de leur origine.

Quelle que soit d'ailleurs l'eau à étudier, son analyse se fait toujours de la même manière. Mais, suivant les usages à laquelle on la destine, on peut se dispenser d'un ou de plusieurs des dosages que comporte une analyse complète.

132. Dosage des gaz dissous. — Pour analyser les gaz tenus en dissolution, on met dans un ballon (*fig.* 29) un volume déterminé d'eau, que l'on fait bouillir, et l'on a soin de recueillir les premières vapeurs qui entraînent tous les gaz avec elles. L'expérience se dispose comme il est indiqué ci-contre. La fiole A qui reçoit l'eau est pesée vide, puis remplie d'eau presque jusqu'au rebord du goulot, et pesée en cet état. La différence est le poids de l'eau mise en essai. On y adapte un bouchon, concave par le bas, et traversé par un tube *abc* recourbé et terminé par un petit bec. Une partie

de l'eau du goulot doit refluer dans ce tube. On place la fiole sur un fourneau. On dispose à côté une terrine ou un mortier B, à moitié rempli de mercure, sur lequel on renverse un tube barométrique *ed* divisé en parties égales, en centimètres cubes par exemple, entièrement plein de mercure. On allume le fourneau, et le premier effet de la dilatation produite par la chaleur est d'achever de remplir d'eau le tube abducteur *abc*. Quand l'eau commence à sortir par le bec, on introduit celui-ci sous le tube renversé. Bientôt l'ébullition se manifeste, et la vapeur se dégage à l'intérieur du tube où elle se condense, tandis que les gaz gagnent le sommet du tube et le remplissent en partie, chassant, par leur pression, le mercure d'abord, puis l'eau condensée. Au moment où le tube paraît entièrement vide, on écarte le bec, on éteint le fourneau et on laisse refroidir. La pression intérieure diminuant, le mercure, surmonté d'une petite couche d'eau, remonte dans le tube. Avec un peu d'habitude, on arrive à ne conserver qu'une couche d'eau de 1 à 2 centimètres de hauteur.

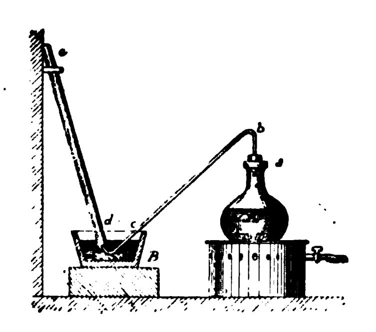


Fig. 29.

Lorsque le tout est revenu à la température ambiante, on place le tube bien verticalement, et on note le nombre N de divisions qu'y occupent les gaz. On mesure au cathétomètre la colonne de mercure et la colonne d'eau dans le tube, et on consulte le baromètre et le thermomètre. La hauteur d'eau est divisée par 13,5, et le résultat ajouté à la hauteur du mercure : la somme représente la charge totale *h* de l'eau et du mercure. Si H est la pression baro-

métrique, f la tension de la vapeur d'eau à la température ambiante t, le tout exprimé en colonnes de mercure, $H - h - f$ est la pression supportée par les gaz. Le volume V de gaz, supposé ramené à la température 0° et à la pression de 0m,760, est :

$$V = N \frac{H - h - f}{0,760} \frac{1}{1 + 0,0037\,t}.$$

Ayant ainsi le volume total de gaz, on fait passer dans le tube un petit morceau de potasse caustique, qui gagne la surface et se dissout dans l'eau. Au bout d'un temps assez long, que l'on abrège en inclinant de temps en temps le tube, afin d'imbiber de potasse les parois de la chambre du vide, cette potasse s'empare de la totalité de l'acide carbonique. Le volume du gaz diminue, n'occupe plus qu'un nombre N′ de divisions, que l'on ramène comme ci-dessus au volume V′ pris à la température 0° et à la pression 0m,760. La différence V — V′ est le volume de l'acide carbonique. Il y a ici une incertitude sur la valeur à attribuer au nombre f, la tension de la vapeur d'une dissolution de potasse étant sans doute moindre que celle de l'eau pure, mais dans une proportion qui n'a pas été bien étudiée.

Fig. 30.

Au moyen d'une pipette recourbée (*fig.* 30) dont on place le bec sous le tube, et dans laquelle on souffle légèment, on introduit quelques centimètres cubes d'une dissolution concentrée d'acide pyrogallique. Cet acide noircit et s'altère au contact de l'oxygène en l'absorbant. Lorsque le volume ne diminue plus, on mesure de nouveau le gaz restant, et son volume V″ est celui de l'azote. La différence V′ — V″ est le volume de l'oxygène.

133. Dosage de l'ammoniaque. — Le dosage de l'ammoniaque dans l'eau est fondé sur la volatilité de cette base lorsqu'elle est en liberté. Quand on fait bouillir une dissolution d'un sel ammoniacal avec un alcali fixe, potasse ou soude, ou encore avec une terre alcaline, chaux, baryte ou magnésie, l'ammoniaque se volatilise avec les premières vapeurs d'eau ; l'expérience a constaté qu'elle a disparu entièrement lorsque le premier cinquième de l'eau a été vaporisé. Si donc on place dans un ballon un litre d'eau avec un peu de potasse, ou mieux de magnésie, qu'on le fasse bouillir en condensant les vapeurs, jusqu'à ce que le cinquième ait été distillé, le liquide condensé est une dissolution pure d'ammoniaque et renferme, sous un volume de 200 centimètres cubes, la totalité de l'ammoniaque existant dans le litre d'eau mis en expérience.

L'appareil le meilleur pour faire cette distillation est une sorte d'alambic en verre (*fig.* 31), dont la disposition est due à M. Boussingault. Le ballon A reçoit 1/2 litre de l'eau à distiller, et porte un bouchon à deux tubes: l'un *a*, droit et à entonnoir, descend jusqu'au fond du ballon; l'autre *b*, qui est le tube de dégagement, s'élève d'abord, puis redescend pour se raccorder avec le serpentin en verre *cd* au moyen d'un bouchon *c*, bien ajusté dans un entonnoir placé au sommet du serpentin. Le serpentin est plongé dans une allonge maintenue froide par de l'eau qu'amène, à la partie inférieure *e*, un vase de Mariotte B, et qui

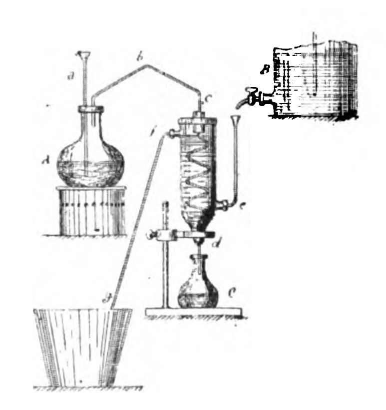


FIG. 31.

s'échappe par un tube *fg* adapté à la partie supérieure. Les vapeurs ammoniacales qui se condensent sortent par le bout inférieur *d* du serpentin et sont recueillies dans une fiole *c*.

La quantité d'ammoniaque étant très faible dans les eaux, on ne peut pas toujours se contenter d'une seule opération. On distille alors successivement une série de litres d'eau, 10 par exemple, et on réunit dans un même bocal tous les produits de la distillation, formant alors 2 litres. Puis, on fait passer de nouveau ces produits dans l'appareil, et on recueille une nouvelle liqueur dont le volume n'est plus que le 1/5 du précédent, soit 0 lit. 40. On recommence de nouveau, et ainsi de suite, jusqu'à ce que l'on n'ait plus qu'environ 200 centimètres cubes de liquide. A chaque distillation, l'ammoniaque entière passe et se condense avec les premières vapeurs.

On peut aussi faire bouillir l'eau dans une grande capsule de porcelaine, où l'on a mis un peu d'acide sulfurique ou oxalique, qui empêchent l'ammoniaque de se volatiliser à l'état de carbonate. On ajoute de l'eau à mesure qu'elle s'évapore, jusqu'à ce que tout l'échantillon ait été employé, et on s'arrête lorsque le résidu se trouve concentré au volume de 1/2 litre environ. C'est ce résidu qu'on porte dans le ballon de l'appareil qui vient d'être décrit, et que l'on distille en présence d'un excès de base fixe.

D'une manière comme de l'autre, on a réuni la totalité de l'ammoniaque du volume d'eau mis en expérience dans une dissolution de 200 centimètres cubes au plus, qui ne renferme pas d'autres produits.

Pour la doser on a recours aux liqueurs titrées. On se sert d'une dissolution normale d'acide sulfurique, dont un volume, représenté par N divisions de la burette, ren-

ferme un poids connu p d'acide sulfurique équivalant à un poids a d'ammoniaque. On place cette dissolution dans la burette, et on la verse dans la dissolution ammoniacale préalablement bleuie par la teinture de tournesol, jusqu'à ce qu'elle vire au rouge. S'il faut employer pour cela n divisions, la dose d'ammoniaque est $\frac{n}{N}a$.

Avant de procéder à cette analyse, qui est longue et délicate, il est bon de se rendre compte, par une recherche qualitative, de la présence de l'ammoniaque. On la reconnaît facilement avec le réactif de Nessler.

Ce réactif se prépare de la façon suivante: 5 grammes d'iodure de potassium sont dissous dans leur poids d'eau. On y ajoute une solution chaude et saturée de bichlorure de mercure jusqu'à ce que le précipité formé refuse de s'y dissoudre; la quantité de bichlorure ainsi ajoutée est de 2 grammes à 2 gr. 5. On filtre la solution et on la mélange avec 15 grammes d'hydrate de potasse, dissous dans 30 centimètres cubes d'eau. Après avoir étendu le tout à 100 centimètres cubes, on y verse encore quelques gouttes de la solution de bichlorure, et on décante lorsque le précipité est complètement déposé.

Cette solution doit être conservée dans des flacons bien bouchés d'où la quantité nécessaire à un essai est prélevée, au moment de l'emploi, à l'aide d'une pipette.

Elle donne une coloration brun foncé avec l'ammoniaque.

Il est nécessaire que l'eau sur laquelle on opère ne renferme plus de terres alcalines, qui feraient perdre à la réaction de sa sensibilité.

On peut obtenir ce résultat en additionnant l'eau d'une quantité convenable de potasse caustique et de carbonate alcalin, laissant reposer et opérant sur la liqueur décantée.

Mais il est préférable de distiller une partie de l'eau dont on dispose pour cette recherche, avec un petit excès de carbonate de soude, et d'ajouter le réactif dans les premiers centimètres cubes qui passent à la distillation.

Le réactif de Nessler peut servir à évaluer la quantité d'ammoniaque par comparaison de la teinte obtenue avec celle d'une solution titrée. On distille un volume déterminé de l'eau, 1/2 litre par exemple, en présence d'une base, ou encore d'un carbonate terreux, et l'on recueille le premier cinquième du produit de la distillation, soit 100 centimètres cubes, qui sont additionnés de 2 centimètres cubes de réactif et se colorent s'il y a de l'ammoniaque.

D'autre part, on ajoute à 100 centimètres cubes d'eau distillée, bien privée d'ammoniaque, le même volume de la liqueur de Nessler. Puis, au moyen d'une burette graduée, on verse, en agitant sans interruption avec une baguette de verre une solution renfermant, par litre, 0 gr. 1 d'ammoniaque à l'état de sel, jusqu'à ce que la coloration soit d'une égale intensité que celle du liquide distillé. La quantité d'ammoniaque ainsi versée est égale à celle de l'échantillon.

On peut encore se servir du colorimètre en l'employant comme il a été indiqué au dosage du carbone (n° 102).

134. Dosage de l'acide azotique. — La présence de l'acide azotique dans l'eau peut être constatée en faisant évaporer à sec une certaine quantité d'eau, et traitant le résidu par l'acide sulfurique et la brucine, comme il a été dit au n° 5. Pour doser l'acide azotique, on commence par concentrer le volume d'eau sur lequel on veut opérer dans une capsule de porcelaine. Lorsque le volume de l'eau est réduit à quelques centimètres cubes, on la jette sur un filtre, ainsi que les eaux de

lavage de la capsule, et on recueille le liquide dans une fiole, où l'on ajoute une dissolution de sulfate d'argent pour précipiter le chlore. On fait bouillir, on filtre, et on concentre au besoin la liqueur jusqu'à ce qu'elle n'occupe plus qu'un volume de 30 à 40 centimètres cubes.

Cette liqueur est versée dans une cornue tubulée A (*fig.* 32), dont le col entre dans un ballon B servant de récipient. Il est bon de mettre sur ce ballon un linge mouillé, qui le refroidit, et que l'on renouvelle quand il s'échauffe. La panse de la cornue est remplie de fragments grossiers de verre pilé, intimement mêlés de peroxyde de manganèse en poudre, et imbibés d'une dissolution concentrée de bichromate de potasse. Ces deux corps sont destinés à brûler la matière organique restée dans l'eau, sans que l'acide azotique soit altéré. On ajoute, enfin, de l'acide sulfurique concentré, et on chauffe avec précaution. L'acide azotique, déplacé par l'acide sulfurique, se volatilise et se rend dans le ballon B avec les vapeurs d'eau. On arrête l'opération lorsque l'apparition de vapeurs blanches annonce que l'acide sulfurique commence à se volatiliser à son tour.

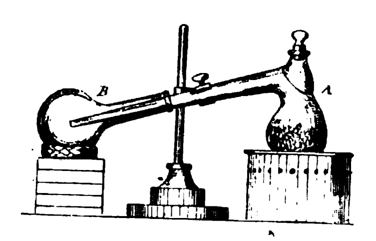


Fig. 32.

La liqueur recueillie dans le ballon est une dissolution étendue d'acide azotique, mêlé d'une petite quantité d'acide sulfurique et d'acide chromique. On la fait bouillir après y avoir mis un peu de carbonate de baryte et on filtre. La liqueur filtrée ne renferme que de l'azotate de baryte, que l'on peut évaporer à sec et peser directement ou bien doser par l'acide sulfurique à l'état de sulfate de

baryte. Le calcul donne la dose d'acide nitrique correspondante.

135. Évaluation des matières organiques. — Il est difficile de doser avec beaucoup de précision les matières organiques restées en dissolution dans l'eau.

On fait évaporer avec précaution 1 ou plusieurs litres dans une capsule tarée, qu'on laisse très longtemps au bain de sable avant de la peser. La différence du poids de la capsule avant et après l'évaporation donne la quantité totale des matières dissoutes par l'eau; c'est le résidu total de l'évaporation. On porte ensuite la capsule et son contenu au rouge dans le moufle, et les matières organiques se brûlent. La différence entre la pesée faite alors et la précédente donne le poids de la matière organique.

Cette opération demande des précautions délicates. Comme, à la chaleur rouge, une partie des carbonates a pu être dissociée, on verse dans la capsule, avant d'en faire la pesée, une dissolution de carbonate d'ammoniaque. On la porte au bain de sable pour dessécher le résidu, puis on la chauffe avec précaution sur un fourneau pour chasser le carbonate d'ammoniaque non encore volatilisé.

Le résultat de cette opération ne donne pas exactement le poids réel des matières organiques. Lorsque l'eau renferme du chlorure de magnésium, celui-ci est décomposé par la chaleur et se transforme partiellement en carbonate de magnésie. Dans les eaux chargées de nitrates, ceux-ci se décomposent pendant la calcination en présence des matières organiques, dont le dosage est alors à peu près impossible.

Quelquefois, ce dosage par différence est complété par un dosage direct de l'azote des matières organiques. On

opère sur une autre partie de l'échantillon, et le résidu total obtenu par évaporation est détaché avec soin de la capsule et porté au tube à combustion qui sera décrit plus loin (n° 146).

On peut, enfin, avoir recours à une méthode volumétrique. Dans un volume V de l'eau légèrement acidulée, on verse au moyen d'une burette du permanganate rouge de potasse, et on note le nombre n de divisions qu'il faut employer pour obtenir une coloration rose de l'eau. La dissolution du permanganate est titrée par rapport à une liqueur normale d'acide oxalique, renfermant un poids p de ce corps dans un volume V. S'il faut employer N divisions de permanganate, pour obtenir la coloration rose dans ce volume de la liqueur normale, l'eau essayée renferme une dose de matières organiques qui équivaut à un poids $p\frac{n}{N}$ d'acide oxalique.

Au lieu d'évaluer les matières organiques en acide oxalique, le Comité consultatif d'hygiène publique de France a, sur le rapport de M. Pouchet, recommandé de préférence le procédé de M. Albert Lévy, qui consiste à déterminer la proportion d'oxygène qu'une solution de permanganate de potasse est susceptible de céder aux matières organiques en dissolution dans l'eau rendue légèrement alcaline. Pour cela, on introduit dans un ballon un volume déterminé d'eau, on y ajoute, pour chaque fraction de 100 centimètres cubes, 3 centimètres cubes d'une solution au dixième de bicarbonate de soude, et 10 centimètres cubes d'une solution renfermant 0 gr. 5 de permanganate de potasse par litre.

Le mélange est ensuite porté à l'ébullition que l'on maintient exactement pendant 10 minutes ; au bout de ce temps, la liqueur doit être encore manifestement vio-

lacée, car le permanganate doit rester en excès pendant la durée de l'opération. S'il n'en était pas ainsi, on recommencerait, en employant un volume plus grand, mais toujours parfaitement connu, de la liqueur de permanganate. On laisse l'eau se refroidir et l'on acidifie par 2 à 3 centimètres cubes d'acide sulfurique, puis on y verse 5 centimètres cubes d'une solution renfermant par litre 10 grammes d'acide sulfurique et 20 grammes de sulfate ferreux ammoniacal. Lorsque la liqueur est entièrement décolorée, on verse, au moyen d'une burette graduée, de la solution de permanganate, jusqu'à ce qu'une dernière goutte produise une teinte violette persistante ; et comme on connaît la valeur en poids de l'oxygène disponible dans 1 litre (0 gr. 125) de la liqueur de permanganate, on en déduit facilement la quantité d'oxygène cédée aux matières organiques.

136. Analyse des sels minéraux. — Le résidu qui reste après le grillage des matières organiques renferme les sels minéraux qui étaient en dissolution dans l'eau.

On y ajoute un peu d'acide chlorhydrique et on évapore à sec de nouveau ; puis, on reprend par l'eau acidulée, et on filtre. On achève alors l'analyse comme celle de la chaux (chap. II, § 4). On obtient de cette façon la silice, l'alumine et le peroxyde de fer, la chaux et la magnésie.

Il reste ensuite à déterminer l'acide sulfurique, le chlore et les alcalis. Pour chacun de ces éléments, on fait concentrer à part 1 litre ou 2 de l'eau à essayer, jusqu'à ce qu'elle soit réduite à un résidu de 30 à 50 centimètres cubes, et on procède comme il suit :

Alcalis. — On traite le résidu par l'eau de baryte, qui précipite les acides sulfurique et carbonique, et

toutes les bases, sauf les alcalis. On filtre, et dans la liqueur on ajoute un excès d'acide sulfurique, qui précipite la baryte. On filtre de nouveau, on évapore à sec la liqueur et on calcine le résidu, qui est du sulfate alcalin. On le pèse, on le reprend par l'eau et on y dose l'acide sulfurique. La différence représente les alcalis. Si l'on voulait séparer la soude et la potasse, on opérerait comme il sera expliqué au n° 148. Mais cette recherche est rarement utile.

Acide sulfurique. — Le résidu est mis en digestion avec une dissolution de carbonate d'ammoniaque, que l'on agite de temps en temps, puis filtré. La liqueur est traitée par le chlorure de baryum acide, comme à l'ordinaire.

Chlore. — On peut doser le chlore en acidulant le résidu par l'acide nitrique, le filtrant au besoin, et le traitant ensuite par le nitrate d'argent. On obtient un précipité de chlorure d'argent, que l'on recueille sur un filtre et que l'on pèse après le grillage. On en déduit le poids du chlore correspondant.

Il est préférable de doser le chlore au moyen d'une liqueur titrée de nitrate d'argent. On prépare une dissolution renfermant 40 à 50 grammes de nitrate d'argent par litre. On en cherche le titre, en prélevant une pipette, où l'on dose l'argent par l'acide chlorhydrique. On a ainsi la quantité de chlore qui répond à un volume donné de la liqueur normale. On la met dans un bocal bien bouché et on la conserve pour l'usage. On colle sur le bocal une étiquette indiquant la dose c de chlore qui répond à un nombre donné N de divisions de la burette dont on se sert.

La liqueur où l'on veut doser le chlore doit être neutre. On la place dans un vase à saturation avec quelques gouttes d'une dissolution de chromate neutre de potasse,

qui la colore en jaune. Puis, on y verse la dissolution normale d'argent. Tant qu'il y a du chlore, celui-ci se combine à l'argent, et l'acide nitrique à la base du chlorure en dissolution. Quand tout le chlore est saturé, une nouvelle goutte de nitrate d'argent réagit sur le chromate de potasse et produit un chromate d'argent très légèrement soluble, doué d'une coloration rouge intense. En s'arrêtant au moment où la coloration rouge se produit, et faisant la lecture, on obtient le nombre n de divisions de la burette répondant au chlore en dissolution. La dose cherchée est alors $\frac{n}{N} c$.

Pour appliquer ce procédé aux eaux, il faut filtrer le résidu de leur concentration au-dessus du vase à saturation, en le lavant avec de l'eau distillée.

137. Recherche du plomb, du zinc et du cuivre. — Quelques eaux très pures, après leur passage dans des tuyaux en plomb ou d'autres appareils métalliques, peuvent se charger de traces de plomb, de zinc et quelquefois même de cuivre. Les eaux pluviales, par exemple, qui ont circulé sur les constructions couvertes avec ces métaux, en renferment presque toujours, et, quand elles sont employées à l'alimentation, elles peuvent être la source d'accidents morbides, quelquefois sérieux, dont la cause reste bien souvent ignorée.

Pour reconnaître l'existence de ces métaux, on évapore un volume aussi grand que possible de l'eau suspecte, après l'avoir préalablement acidulée par un très faible excès d'acide azotique, et, lorsque le volume est réduit à quelques centimètres cubes, on y fait passer un courant d'hydrogène sulfuré. Si la liqueur reste incolore, on peut être certain que l'eau ne renferme ni plomb, ni cuivre ;

mais si, au contraire, elle prend une teinte brune, même très légère, cette teinte est due à la présence de l'un au moins de ces métaux. Dans ce cas, on continue à faire passer le courant d'hydrogène sulfuré, qui n'est interrompu qu'après la saturation de la liqueur. On abandonne ensuite pendant quelque temps dans un lieu chaud.

Les sulfures de plomb et de cuivre se précipitent. Après les avoir recueillis et lavés avec de l'eau chargée d'hydrogène sulfuré, on les traite par quelques gouttes d'acide nitrique qui, sous l'action d'une douce chaleur, les transforme en sulfates. On continue de chauffer jusqu'à complète évaporation de l'excès d'acide.

Le résidu est repris par un peu d'eau acidulée à l'aide d'une goutte d'acide sulfurique. S'il reste un résidu blanc, c'est du sulfate de plomb. On le reçoit sur un filtre, et on le caractérise en le traitant par une solution de potasse ou de soude qui doit le dissoudre, et dont il peut être précipité à l'état de sulfure, par l'acide sulfhydrique ou par un sulfure alcalin.

La liqueur séparée du sulfate de plomb par filtration est divisée en deux parties ; dans l'une, on verse de l'ammoniaque et, dans l'autre, quelques gouttes de ferrocyanure. S'il y a du cuivre, la première prend une coloration bleu céleste, et la seconde donne un précipité marron.

La liqueur acide, saturée d'hydrogène sulfuré, qui a été séparée des sulfures de plomb et de cuivre, peut renfermer du zinc. On l'additionne d'acétate de soude qui s'empare de l'acide azotique, et la liqueur ne contient plus que de l'acide acétique libre, en présence duquel, sous l'action de l'hydrogène sulfuré, le sulfure de zinc se précipite.

Pour s'assurer si le précipité blanc obtenu est bien du

sulfure de zinc, on le rassemble sur un filtre, on le lave et on fait sécher. On enroule ensuite le filtre d'une spirale de fil de platine, dans laquelle il est inciné à la flamme d'un bec Bunsen. S'il y a du zinc, les cendres que l'on obtient ainsi prennent à chaud une coloration jaune caractéristique. Si la coloration paraissait douteuse, on ferait tomber les cendres dans une petite capsule, après les avoir humectées avec une solution étendue d'azotate de cobalt et les avoir séchées; on les calcinerait et on observerait si le résidu se colore nettement en vert.

138. Essais sommaires. — Une analyse complète de l'eau permet seule de juger de ses qualités par sa composition. On peut cependant avoir des indices par quelques essais sommaires.

Lorsqu'on fait chauffer l'eau dans une fiole de verre, on voit se dégager des bulles de gaz, et leur abondance est un indice de l'aération de l'eau.

Si on la fait bouillir ensuite, on la voit le plus souvent se troubler, par la précipitation du carbonate de chaux, dissous dans l'eau à la faveur d'un excès d'acide carbonique que la chaleur fait dégager. L'intensité du trouble fait juger de l'abondance de ce carbonate de chaux.

Enfin, quand on concentre l'eau sous un très petit volume, elle prend une odeur de vase d'autant plus prononcée qu'elle renferme plus de matières organiques.

Ces essais sont de simples indices, sans aucune précision, et pouvant seulement guider dans le choix des échantillons à étudier sérieusement.

139. Hydrotimétrie. — Il est un procédé d'un usage facile et prompt, qui permet de mesurer la qualité des eaux au point de vue de leur crudité, c'est-à-dire de

leur faculté de produire des grumeaux avec les corps gras : c'est la méthode hydrotimétrique. Elle est basée sur cette observation que, si on verse goutte à goutte une dissolution de savon dans une eau plus ou moins crue, les premières gouttes sont décomposées et s'emploient à former des grumeaux sous forme de précipité blanc. Ce n'est que lorsque toute la chaux et la magnésie ont disparu dans les grumeaux qu'une nouvelle goutte ajoutée à l'eau y reste en dissolution et lui donne de l'onctuosité. Si l'on agite alors vivement, il s'y produit une mousse persistante, tandis qu'auparavant la mousse ne se formait pas ou tombait immédiatement.

On se sert d'une dissolution de savon dans l'alcool, que l'ont met dans une petite burette graduée. La liqueur et la burette hydrotimétriques se trouvent chez les marchands de produits chimiques. La liqueur est préparée de telle façon qu'une quantité de sel de chaux équivalente à $\frac{1}{25}$ de centigramme de carbonate soit saturée par le savon contenu dans une division de la burette. Si donc on opère sur $\frac{1}{25}$ de litre, ou 40 centimètres cubes, le nombre de divisions de la burette qu'il faudra y verser pour obtenir la mousse persistante indiquera la présence d'un nombre égal de centigrammes de carbonate de chaux, ou de l'équivalent en sels terreux. Ce nombre est ce qu'on appelle le *degré hydrotimétrique*.

Pour faire l'essai, on a un petit flacon jaugé à 40 centimètres cubes. On y met de l'eau jusqu'au trait; puis, avec la burette, on verse goutte à goutte la dissolution, en agitant vivement à chaque reprise, jusqu'à ce qu'on obtienne de la mousse persistante. On fait alors la lecture du nombre de divisions versées, et ce nombre donne le degré de l'eau.

On juge que la mousse est persistante lorsque les bulles qui la forment ne se crèvent pas, et que la mousse n'a pas perdu sensiblement de son volume au bout de cinq minutes.

Si l'eau est très chargée, en sorte que son degré dépasse 30° environ, l'abondance des grumeaux qui flottent empêche la mousse de se former librement. On ne prend alors que 10, 20 ou 30 centimètres cubes de l'eau, et on l'étend à 40 au moyen d'eau distillée. Les flacons portent des subdivisions disposées à cet effet.

Le degré hydrotimétrique trouvé doit alors être multiplié par 4, 2 ou $\frac{4}{3}$.

Les eaux de rivières, qui sont bonnes pour les usages domestiques quand elles ne sont pas polluées, ont un degré hydrotimétrique généralement inférieur à 20°. A l'amont de Paris, la Seine marque de 20° à 25°. Les eaux d'Arcueil et de l'Ourcq, qui sont déjà médiocres, donnent 28° à 30°. L'eau qui était distribuée à Belleville, il y a quelques années, marquait jusqu'à 128°, et les puits de Paris vont encore plus loin ; ce sont des eaux détestables.

Ce procédé permet de reconnaître immédiatement les eaux impropres aux usages domestiques par leur crudité. Mais il ne peut remplacer une analyse, car il n'indique pas la présence des sels alcalins et des matières organiques, et il ne distingue pas la nature des acides unis à la chaux.

L'hydrotimétrie permet cependant, dans une certaine mesure, de séparer le sulfate du carbonate de chaux. Après avoir pris le dégré hydrotimétrique de l'eau, on en fait bouillir un volume déterminé. Le carbonate de chaux, insoluble dans l'eau dépourvue d'acide carbonique, se dépose pendant l'ébullition. On mesure le volume auquel

l'eau s'est réduite, et on en prend le degré hydrotimétrique, que l'on multiplie par le rapport des volumes avant et après l'ébullition. On a ainsi le degré persistant, qui est principalement dû au sulfate de chaux.

140. Application aux usages domestiques. — L'eau destinée à la boisson doit être limpide ; si elle ne l'est pas naturellement, on peut la rendre telle à l'aide de filtres. Elle doit être sans odeur et sans saveur désagréable ; ce sont des défauts que les sens perçoivent directement. Il faut qu'elle soit bien aérée, riche surtout en oxygène. Elle doit renfermer en dissolution une dose modérée de sels minéraux. Elle doit être dépourvue de matières organiques en notable proportion.

Tous les sels minéraux n'exercent pas cependant une action semblable. Le sulfate de chaux est lourd à l'estomac et rend les digestions pénibles. Le bicarbonate de chaux, au contraire, les facilite dans une certaine mesure, ainsi que les sels alcalins.

Les matières organiques sont, les unes inoffensives, les autres nocives. Malheureusement, la chimie ne possède pas actuellement de procédé pour distinguer les unes des autres. On a vu qu'elles se déterminent en bloc par divers procédés, dont aucun, même celui qui détermine l'oxygène nécessaire à leur combustion, ne donne un résultat proportionnel à leur poids et, à plus forte raison, à leur nocivité.

La bactériologie, qui ne rentre pas dans le cadre de cet ouvrage, fournit seule des indications précises sur les organismes dangereux dont l'eau peut être le véhicule.

L'eau destinée à la cuisson des aliments doit être limpide, sans odeur ni saveur désagréable. Son degré d'aération est sans importance, et les matières organiques y

sont rendues inoffensives par la cuisson. Mais il importe qu'elles renferment le moins possible de bases terreuses. Les parties gélatineuses et gommeuses des aliments végétaux forment avec la chaux et la magnésie des composés insolubles, très durs au palais et d'une digestion difficile. Les légumes farineux, et surtout les haricots, sont particulièrement sensibles à cette réaction.

Si elles doivent être employées avec du savon, les eaux réclament à peu près les mêmes qualités, sauf l'odeur et la saveur, qui sont indifférentes. Les bases terreuses y forment, par double décomposition, des savons insolubles sous forme de grumeaux, qui font perdre une partie du savon et rendent le linge aigre au toucher.

Il est assez difficile de préciser la limite que ne doivent pas dépasser les doses des divers éléments étrangers contenus dans les eaux, pour qu'elles soient considérées comme de bonne qualité. Le Comité consultatif d'hygiène publique de France a donné à cet égard, pour les eaux destinées à l'alimentation, certaines règles qui sont résumées dans le tableau suivant :

ÉLÉMENTS DÉTERMINÉS	EAU TRÈS PURE	EAU POTABLE	EAU SUSPECTE	EAU MAUVAISE
Chlore, par litre.....	Moins de $0^{g},015$	Moins de $0^{g},04$	de $0^{g},05$ à $0^{g},10$	Plus de $0^{g},10$
Acide sulfurique, par litre...............	$0^{g},002$ à $0^{g},005$	$0^{g},005$ à $0^{g},03$	Plus de $0^{g},03$	Plus de $0^{g},03$
Oxygène emprunté au permanganate, par litre.	Moins de $0^{g},001$	Moins de $0^{g},002$	$0^{g},003$ à $0^{g},004$	Plus de $0^{g},004$
Perte de poids par litre dans la calcination du résidu...	Moins de $0^{g},015$	Moins de $0^{g},04$	$0^{g},04$ à $0^{g},07$	Plus de 20
Degré hydrotimétrique total..........	de 5 à 15	15 à 30	Au-dessus de 30	Au-dessus de 100
Degré hydrotimétrique persistant.....	de 2 à 5	5 à 12	de 12 à 18	Au-dessus de 20

141. Application aux chaudières à vapeur. — Il est très important de connaître la composition des eaux que l'on doit employer dans les chaudières à vapeur. Lorsqu'on y fait bouillir l'eau, il se produit les mêmes effets que dans une capsule de laboratoire : l'eau s'échappe sous forme de vapeur, et il reste un résidu fixe souvent très pernicieux.

Ce résidu se compose de trois parties distinctes :

1° Les sels solubles, qui restent dans les eaux mères et disparaissent dans les lavages ;

2° Les résidus solides restant en suspension, sable, argile, vase, qui forment au fond des chaudières une boue sans consistance, facile à enlever par les lavages ;

3° Les sels calcaires ou magnésiens, qui étaient en dissolution dans l'eau et se déposent par l'ébullition.

Il y a deux sortes de ces sels, les carbonates d'une part, le sulfate de chaux d'autre part. Les carbonates, qui étaient maintenus en dissolution sous forme de bicarbonates, perdent leur acide carbonique en excès par l'ébullition, et les carbonates neutres se précipitent sous forme d'une poudre grenue, qui se mélange aux boues en suspension et n'a, par elle-même, pas plus d'inconvénients qu'elles.

Le sulfate de chaux, au contraire, est la source des plus grands dangers. Il est assez soluble dans l'eau froide, qui peut en prendre plus de 2 grammes par litre. Quand la température s'élève, sa solubilité diminue et devient nulle vers 200°. Il se dépose alors sous forme de croûtes cristallines adhérentes aux parois de la chaudière. Ces croûtes emprisonnent une partie des dépôts pulvérulents et forment avec eux une sorte de stuc très résistant et très adhérent. Il ne peut guère être enlevé qu'au ciseau, dont l'emploi détériore les chaudières. En outre, ce stuc

est très mauvais conducteur de la chaleur. Pour obtenir dans la chaudière la pression voulue, il faut donc chauffer la tôle, séparée de l'eau par une couche peu conductrice, bien au-delà du degré prévu. Outre une consommation inutile de combustible, il en résulte que les tôles se brûlent et sont promptement hors de service. Mais le plus grave inconvénient de ces dépôts, c'est le danger d'explosion. La croûte cristalline est assez cassante pour qu'il s'y produise quelques fissures par les variations de température. Si une fissure se manifeste au moment où la tôle est surchauffée, il se dégage en ce moment une quantité énorme de vapeur, la pression monte subitement, et il peut y avoir explosion.

Le même danger est à craindre, même en l'absence de sulfate de chaux, si on introduit dans les chaudières des eaux chargées de matières grasses. Il se produit avec des sels calcaires des savons de chaux, qui se déposent sur les parois et forment une croûte semblable à celle qui vient d'être indiquée, moins cassante, mais plus imperméable encore à la chaleur. Les explosions sont à craindre comme dans le cas précédent, et les tôles se détruisent encore plus rapidement par brûlure.

Une analyse complète permet de se rendre compte de la qualité des eaux à ce point de vue. On peut toutefois, dans bien des cas, se contenter de l'essai hydrotimétrique décrit au n° 139. On peut aussi recueillir et peser les sels déposés pendant l'ébullition, puis achever l'évaporation de l'eau et peser le résidu. Le premier dépôt contient les sels sans danger. Le second résidu se compose de ceux qui sont à redouter.

142. Application aux conduites d'eau. — Les ingénieurs ont souvent à s'occuper de la qualité des eaux

qui doivent circuler dans les conduites en maçonnerie ou en métal, où se produisent parfois des obstructions de diverses natures.

Celles qui sont dues au dépôt des matières entraînées en suspension par l'eau présentent peu d'inconvénients. Elles se déposent dans les points de la conduite où la vitesse est trop faible, et s'y accumulent sous forme d'une boue inconsistante dont il est facile de se débarrasser par des chasses.

Il n'en est pas de même des obstructions calcaires ou ferrugineuses, formées de dépôts adhérents aux parois, que l'on ne peut enlever qu'à coups de ciseau ou même en détruisant les conduites.

1° *Incrustations calcaires.* — Les incrustations calcaires se produisent aussi bien dans les conduites en fonte que dans les conduites en maçonnerie. Elles sont dues au carbonate de chaux qui était maintenu en dissolution dans l'eau, sous forme de bicarbonate, à la faveur d'un excès d'acide carbonique. Lorsque cet excès vient à disparaître par une cause quelconque, le carbonate de chaux neutre se précipite, et, l'eau n'étant pas en mouvement tumultueux comme dans les chaudières, il se dépose sur les parois sous forme d'une couche cristalline et adhérente.

Les eaux qui renferment le plus d'acide carbonique libre en dissolution, relativement à leur dose de carbonate de chaux, sont les moins sujettes à produire des incrustations de cette nature.

Certaines eaux, quoique médiocrement chargées de sels fixes, sont incrustantes, parce qu'elles ont peu d'acide carbonique en excès. Telle est, par exemple, celle qui alimentait l'ancien aqueduc de Nîmes; elle ne tient en dissolution par litre que 0 gr. 26 de matières, dont 0 gr. 23

de carbonate de chaux, mais on n'y trouve que 6 centimètres cubes d'acide carbonique, à peine assez pour former les bicarbonates solubles.

Les circonstances qui favorisent le dégagement de l'acide carbonique en dissolution dans l'eau favorisent donc en même temps les incrustations calcaires, la quantité de gaz qui reste dans l'eau devenant insuffisante pour conserver le sel calcaire à l'état de bicarbonate.

Ces circonstances sont assez nombreuses et permettent d'expliquer la plupart des incrustations observées. On peut citer notamment : un séjour prolongé de l'eau à l'air libre ; l'agitation de l'eau et les chocs réitérés du liquide sur les corps environnants; la diminution de la pression dans certains points où les gaz peuvent se dégager; le renouvellement rapide de l'air dans les parties de conduites où l'eau ne coule relativement qu'en faible masse; les variations de température ; la présence de certains végétaux aquatiques dont les parties vertes décomposent l'acide carbonique ; enfin, les actions électriques qui se produisent au contact des métaux d'espèces différentes.

On se mettra à l'abri des accidents de cette nature en évitant avec soin toutes ces circonstances. Il a été proposé, en outre, de saturer les eaux d'acide carbonique avant de les lancer dans les conduites ; mais ce procédé n'est évidemment pas d'une application pratique.

2° *Obstructions ferrugineuses.* — Elles s'observent dans les conduites métalliques où circulent des eaux presque pures, telles que celles qui sortent des terrains primitifs. Ce sont des couronnes ou des tubercules, atteignant parfois des dimensions considérables, au point de réduire de moitié et davantage la section des tuyaux en certains endroits. L'analyse démontre que ces champignons sont entièrement formés de rouille, ou peroxyde de fer hydraté.

La cause de cette oxydation n'est pas connue. Elle paraît toutefois résider dans la qualité de la fonte plutôt que dans celle des eaux. On a observé, en effet, que certains tuyaux s'oxydaient, tandis que d'autres restaient intacts ; et que, si on remplaçait les tuyaux attaqués, les tubercules ne se reproduisaient pas toujours, ou changeaient de place. Peut-être y a-t-il décomposition de l'eau et oxydation du fer par suite d'un phénomène électrique, résultant du défaut d'homogénéité du métal, ou de son contact avec d'autres métaux dans les joints et les soudures.

Pour remédier à cet inconvénient, on a essayé de tremper les tuyaux, avant leur pose, dans un bain d'huile de lin lithargée et de cire ; on a proposé aussi de faire circuler dans les conduites de l'acide chlorhydrique pour dissoudre les champignons ; on les a enlevés mécaniquement au moyen de hérissons puissants, analogues à ceux qui servent au ramonage de cheminées. Mais, le plus souvent, on est conduit à détruire les tuyaux obstrués et à les remplacer par des tuyaux neufs ; à force de changer, on arrive à n'avoir plus que des fontes inattaquables.

143. Irrigations et colmatage. — L'agriculture utilise les eaux naturelles soit en irrigations, soit en colmatages.

Les eaux destinées aux irrigations sont d'autant meilleures qu'elles sont plus chargées de sels en dissolution et de matières organiques. Les plus mauvaises pour la boisson sont souvent les meilleures pour l'alimentation végétale. Parmi les sels en dissolution, ceux à base de potasse sont les plus précieux. Il ne suffit donc pas ici de déterminer la dose totale des alcalis, mais il faut y distinguer la potasse de la soude (voir n° 148).

Il importe que les eaux, lorsqu'elles sont employées en abondance, soient bien aérées, sans quoi elles nuiraient à la respiration des racines. Il ne faut pas non plus qu'elles soient incrustantes, car elles formeraient des dépôts sur les feuilles des végétaux et elles obstrueraient les rigoles. Les mêmes effets seraient dus à des limons trop abondants. Enfin, certaines eaux contractent, par leur séjour dans des terrains tourbeux, des principes acides et astringents qui en rendent la qualité mauvaise.

L'étude de l'eau destinée aux irrigations demande donc une analyse complète, comprenant les gaz, l'azote organique, ammoniacal et nitrique, et les substances fixes.

Lorsqu'il s'agit d'opérer des colmatages, la composition de l'eau a peu d'intérêt; mais il est très important de se rendre compte de la nature des limons qui doivent constituer le sol artificiel. On recueille des échantillons de ces limons, soit en les séparant de l'eau trouble à l'aide d'un filtre, soit en les ramassant dans les points où ils se déposent naturellement sur le sol, et on les soumet à une analyse en tout semblable à celle qui sera expliquée au § 2 (2°).

L'agriculture emploie aussi, soit directement, soit sous forme d'engrais, les liquides que rejettent certaines industries, telles que les féculeries et les distilleries, les purins des fosses à fumier, les eaux vannes de vidanges, les eaux des égouts des villes, les eaux ménagères de toute sorte. Toutes ces eaux sont riches en principes nutritifs pour la végétation.

Elles s'analysent suivant les procédés ordinaires. Elles renferment en quantité notable des principes azotés solides, en même temps que du carbonate d'ammoniaque volatil. Pour doser d'un seul coup tout l'azote existant à ces deux états, on évapore à sec une partie de l'eau avec un excès

d'acide oxalique, on pèse le résidu et on y fait un dosage d'azote (n° 146). On évapore en même temps à sec, cette fois sans acide, une autre partie du liquide, et on opère de même. La différence des deux doses d'azote représente celui qui préexistait à l'état de carbonate d'ammoniaque. Les autres éléments sont déterminés par les procédés ordinaires.

§ 2. — Terres, amendements, engrais et produits agricoles

1° Engrais et produits agricoles

Tous les êtres organisés sont composés d'éléments semblables, que les animaux empruntent aux végétaux; les végétaux eux-mêmes les puisent en partie dans le sol, où les engrais apportent ceux qui s'y trouvent en quantité insuffisante.

L'analyse de tous les produits agricoles, végétaux ou animaux, et celle des engrais, a donc un même but, qui est la détermination des éléments communs dont ils se composent.

144. Préparation des échantillons. — On distingue d'abord dans ces produits trois parties générales : l'eau, les matières organiques et les cendres.

Une première préparation a pour but de séparer ces trois parties les unes des autres.

On commence par porter l'échantillon dans une étuve chauffée modérément, jusqu'à ce qu'il soit assez friable pour se broyer facilement au pilon, ou se réduire en poudre grossière entre les doigts. C'est ce qu'on appelle

la *matière sèche*. On note le poids avant et après dessiccation.

Une partie de cette matière sèche est conservée dans un bocal bien bouché. Une autre partie, que l'on a pesée, est mise dans une capsule tarée, et portée au fourneau à moufle. Quand les cendres sont bien blanches, on les pèse, on note leur poids et on les met également dans un bocal où on les retrouve pour l'analyse.

145. Dosage de l'eau. — Dans la matière sèche, il reste encore une certaine quantité d'humidité que l'on dose en portant 1 ou 2 grammes de la matière dans une étuve maintenue un peu au-dessus de 100°. La perte du poids donne l'humidité restante.

L'eau contenue dans la matière à analyser se compose donc de deux parties : celle que l'on a enlevée par la dessiccation, et celle que l'on a constatée par la perte à l'étuve. Il faut les ajouter ensemble pour avoir l'eau totale.

Si donc m est la quantité d'eau trouvée par dessiccation dans l'unité de poids de l'échantillon, $1 - m$ est le poids de la matière sèche ; et si l'on constate une perte n sur l'unité de poids de cette matière sèche, elle correspond à une perte $n(1 - m)$ sur la matière primitive ; la proportion totale d'eau est alors $m + n(1 - m)$.

146. Dosage de l'azote. — Le poids des matières organiques est la différence entre la matière sèche, déduction faite de l'humidité, et les cendres qu'elle donne. Elle se compose de trois gaz, oxygène, hydrogène et azote, et d'un principe fixe, le carbone.

L'analyse complète de ces divers éléments se fait dans un tube à combustion avec l'oxyde de cuivre, suivant les

procédés indiqués dans les traités de chimie. Mais cette opération, longue et délicate, est le plus souvent inutile. L'oxygène, l'hydrogène et le carbone sont toujours servis en abondance aux plantes. On n'a réellement intérêt à connaître que la proportion de l'azote, qui a seule une valeur vénale en agriculture et dont la dose sert de régulateur pour le prix des engrais.

Ce dosage se fait facilement par un procédé basé sur la transformation de l'azote en ammoniaque, lorsque l'on fait brûler les matières organiques en présence d'une base puissante. On se sert généralement de la chaux sodée.

La chaux sodée se trouve chez les marchands de produits chimiques, qui la préparent en éteignant deux parties de chaux vive dans de l'eau contenant une partie de soude caustique en dissolution. La masse est desséchée dans un creuset et réduite en poudre grossière pour l'usage.

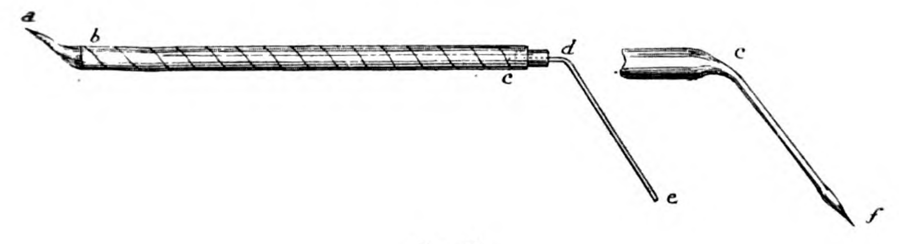


Fig. 33.

On introduit au fond d'un tube à combustion en verre vert, de $0^m,50$ de longueur environ, étiré en pointe fermée *a* à l'une de ses extrémités (*fig.* 33), une petite quantité de chaux sodée, au-dessus de laquelle on place un mélange fait avec soin d'un poids déterminé de la substance à essayer et de chaux sodée. Ce mélange doit

occuper environ les 2/3 du tube, que l'on achève de remplir avec de la chaux sodée.

On enveloppe le tube d'une bande de clinquant *b*, *c*. roulée en spirale et on adapte à son extrémité ouverte, au moyen d'un bouchon percé, un tube de dégagement *de*. Il est préférable de ne pas employer de liège, qui peut se brûler ou laisser échapper les gaz par les joints; on forme le tube de dégagement avec le tube à combustion lui-même. A cet effet, lorsque le tube est chargé, on chauffe au rouge sombre son extrémité *c* et on l'étire obliquement sous forme d'un tube étroit, terminé par un renflement et une pointe fermée *f*. Lorsque l'on veut provoquer le dégagement des gaz, on casse cette pointe.

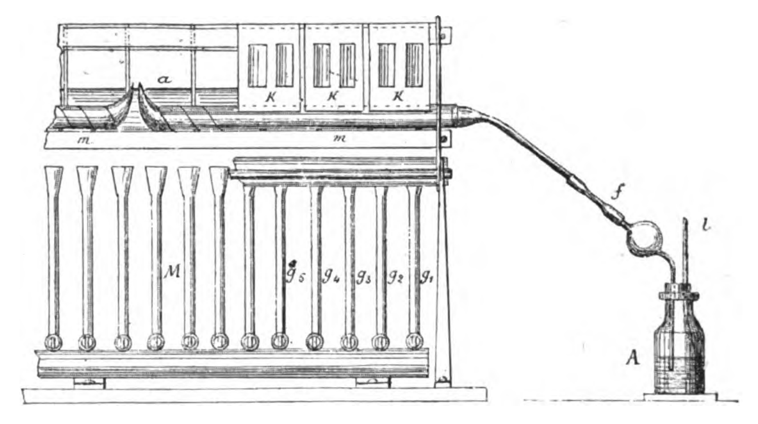


Fig. 34.

Le tube ainsi préparé est porté sur un fourneau M à analyses organiques (*fig*. 34 et 35). La pointe *f* est cassée et mise en communication par un tube en caoutchouc, avec un tube à boule de sûreté qui plonge dans un petit flacon A où l'on a mis une pipette de 10 centimètres cubes d'acide sulfurique titré.

Les fourneaux à gaz pour analyses organiques se com-

posent d'une grille *mm*, sur laquelle repose le tube, chauffée par une série de becs Bunsen *g*, *g*, portant chacun un robinet. La chaleur est concentrée par des briquettes réfractaires K, K, placées au-dessus du tube, et donnant seulement issue aux gaz de la combustion par une fente étroite *n*. Le fourneau est assez long pour que l'on puisse placer un tube à chacune de ses extrémité et faire deux analyses à la fois.

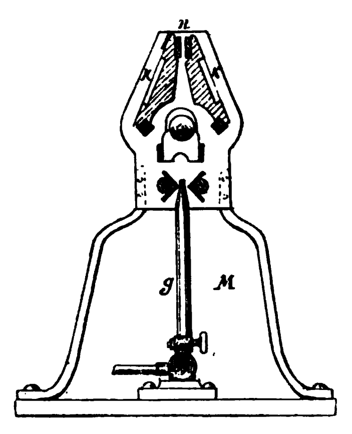


Fig. 35. (Coupe.)

On commence par ouvrir et allumer le premier bec g_1. On voit alors se dégager dans le flacon A des bulles de gaz. Quand le dégagement s'arrête, on allume le second bec g_2, et il se produit de nouvelles bulles ; lorsqu'elles cessent, on ouvre le troisième bec g_3, et ainsi de suite, jusqu'au bec placé sous la pointe fermée *a*. Après que tout dégagement a cessé, on adapte au tube libre *l* du petit flacon A un flacon aspirateur de 2 litres de capacité (*fig*. 36), dont on règle l'écoulement au moyen du robinet *p*. Puis on casse la pointe *a* du tube à combustion, qui se trouve ainsi balayé par le passage de 2 litres d'air. On éteint alors les becs de gaz, on détache le petit flacon A et on procède au titrage du liquide qu'il contient.

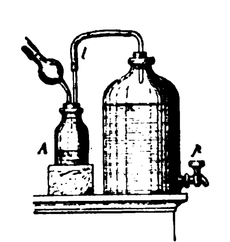


Fig. 36.

Par suite de la combustion en présence de la chaux sodée, l'azote s'est transformé en ammoniaque, qui, au

passage, s'est combinée avec l'acide sulfurique du flacon et l'a partiellement neutralisé.

Il ne reste plus qu'à chercher quelle quantité d'acide sulfurique s'est ainsi neutralisée par les équivalents, et à calculer la dose d'azote correspondante. Soit P le poids d'acide sulfurique titré total contenu dans une pipette, et a la quantité d'azote équivalente. Si l'on trouve qu'après la saturation partielle il reste un poids p d'acide sulfurique libre, il est clair que la dose d'azote est à a comme $P - p$ est à P. Cette dose est donc donnée par la formule $x = \frac{P - p}{P} a$, dans laquelle tout est connu. excepté p.

On ne cherche pas la quantité p elle-même, mais on détermine le rapport $\frac{P - p}{P}$ par des quantités proportionnelles plus faciles à trouver. A cet effet, on prépare à l'avance une liqueur normale de saccharate de chaux telle que 30 à 40 centimètres cubes de cette liqueur saturent 10 centimètres cubes de l'acide sulfurique titré. On s'assure facilement que la liqueur est dans ces limites, en mettant dans un verre une pipette d'acide, colorée en rouge par quelques gouttes de teinture de tournesol, et cherchant combien de pipettes semblables de saccharate de chaux il faut y ajouter pour la faire passer au bleu. Cette dissolution est conservée dans un flacon bien bouché.

Pour faire le titrage de la dissolution partiellement saturée, on remplit de saccharate de chaux la burette graduée (n° 34). On recueille dans un vase à saturation le liquide du flacon A, que l'on lave avec soin, et on le rougit avec quelques gouttes de teinture de tournesol. On y verse le saccharate de chaux lentement au moyen de la burette, en agitant constamment, et on s'arrête quand

la liqueur vire au bleu. On note le nombre n de divisions employées. Immédiatement après, on recommence la même opération sur une pipette d'acide titré pur, et on note le nombre de divisions N nécessaires pour obtenir le virage au bleu. Il est clair que N et n sont proportionnels à P et à p, et que $\frac{P-p}{P}=\frac{N-n}{N}$. On a donc, enfin,

$$x=\frac{N-n}{N}a.$$

Ce procédé donne l'azote existant dans les corps organiques et les engrais à l'état d'azote simplement combiné ou d'ammoniaque, mais non à l'état d'acide azotique.

Lorsqu'il s'agit d'un engrais où l'on suppose de l'acide azotique, on en fait bouillir une dose, on filtre pour séparer les parties insolubles, et on traite la liqueur comme il a été expliqué au n° 134. L'azote ainsi trouvé doit être ajouté à celui que donne le procédé de la chaux sodée.

147. Analyse des cendres. — Les cendres des végétaux et des engrais sont composées de silice, de sulfates, chlorhydrates, carbonates et phosphates de chaux, de magnésie, de potasse et de soude, avec un peu d'alumine et de peroxyde de fer.

Le chlore se dose sur une prise d'échantillon spéciale que l'on épuise par l'eau, et que l'on traite après filtration, soit par la liqueur titrée de nitrate d'argent en présence du chromate de potasse (n° 136), soit en le transformant par le nitrate acide d'argent en chlorure d'argent, que l'on calcine et que l'on pèse.

L'acide sulfurique se dose sur une autre prise d'échan-

tillon, que l'on met en digestion pendant vingt-quatre heures avec du carbonate d'ammoniaque. La liqueur filtrée et acidifiée est ensuite traitée par le chlorure de baryum, et l'acide sulfurique dosé à l'état de sulfate de baryte.

Il est rare que l'on ait intérêt à doser l'acide carbonique ; on le ferait d'après les méthodes expliquées au numéro 83.

Pour avoir les autres éléments, on prend une dose d'échantillon, et on l'évapore à sec dans une capsule de porcelaine avec un excès d'acide chlorhydrique. On calcine au fourneau, on traite de nouveau par l'acide chlorhydrique et on évapore une seconde fois à sec. On reprend par l'eau acidulée, et on jette sur un filtre. Le résidu qui reste sur le filtre est la silice. Dans quelques engrais, il renferme en outre du sable et de l'argile.

Dans la liqueur, on ajoute de l'acétate et de l'oxalate d'ammoniaque. Bien que la liqueur soit acide, l'oxalate de chaux se précipite en entier en présence de l'acide acétique. On filtre, et on calcine au rouge l'oxalate de chaux recueilli. On a ainsi le poids de la chaux.

Dans la liqueur filtrée, on verse de l'acide citrique ou tartrique, puis un excès d'ammoniaque. On laisse reposer à froid pendant un jour, et on trouve un précipité de phosphate ammoniaco-magnésien, que l'on recueille sur un filtre, que l'on calcine et que l'on pèse. On en déduit le poids de la magnésie et d'une partie de l'acide phosphorique.

La liqueur filtrée est additionnée de sulfate de magnésie et traitée de la même manière. Le précipité formé est du phosphate ammoniaco-magnésien renfermant le reste de l'acide phosphorique, qu'il faut ajouter au précédent.

Il peut arriver, dans quelques cas, que tout l'acide phosphorique ait été précipité du premier coup, et que ce soit la magnésie qui se trouve en excès. On s'en aperçoit parce que la seconde opération ne donne plus de précipité. Il faut alors recommencer l'analyse en opérant de la même façon, mais versant dans la dernière liqueur du phosphate de soude au lieu de sulfate de magnésie. Le dernier précipité recueilli donne le complément de la magnésie.

Dans la liqueur, on verse du sulfhydrate d'ammoniaque qui précipite le fer à l'état de sulfure. On filtre, et on calcine le précipité après dessiccation. On obtient ainsi le fer à l'état de peroxyde.

Outre les alcalis, qui demandent un traitement spécial, la liqueur ne contient plus que l'alumine. On peut l'obtenir par l'évaporation à sec et la calcination du résidu. Mais cette opération réussit mal. L'acide organique introduite pendant l'opération s'oppose à la dessiccation à une température modérée, et donne lieu à des soubresauts et à des pertes de matière. Il est préférable de calculer l'alumine par différence. On attaque par l'acide chlorhydrique une prise d'échantillon, on l'évapore à sec comme ci-dessus pour séparer la silice, et on traite la liqueur par l'ammoniaque. On fait bouillir et on filtre. La matière restée sur le filtre est desséchée, calcinée et pesée. Elle se compose du peroxyde de fer, de l'alumine et d'une partie de l'acide phosphorique et de la chaux. On la redissout, et on y dose, par les méthodes indiquées ci-dessus, la chaux et l'acide phosphorique. A leur poids on ajoute celui du peroxyde de fer précédemment déterminé, et on retranche cette somme du poids total du précipité par l'ammoniaque. La différence est le poids de l'alumine.

Il est fort rare qu'il soit utile de déterminer les doses de l'alumine, du peroxyde de fer et de la magnésie, et on se contente ordinairement de connaître celles de la chaux et de l'acide phosphorique. L'analyse se simplifie alors beaucoup.

148. Dosage des alcalis. — Pour obtenir les alcalis, on a recours à une prise spéciale d'échantillon, que l'on fait bouillir avec un excès d'eau de baryte. Toutes les bases non alcalines sont précipitées, ainsi que la silice et les acides sulfurique, phosphorique et carbonique. Si l'on filtre, il ne reste dans la liqueur que des chlorures alcalins et des alcalis en liberté, avec l'excès de baryte.

On y verse un léger excès d'acide sulfurique, et lorsque le précipité a été bien rassemblé à chaud, on le jette sur un filtre qui laisse passer les alcalis à l'état de sulfates. On évapore à sec et on calcine le résidu. Son poids R est celui des sulfates alcalins. Si on reprend par l'eau, et que l'on cherche la dose S de l'acide sulfurique qu'ils renferment, le poids A des alcalis réunis est la différence $R - S$.

Mais, en agriculture, la connaissance de ce poids ne peut suffire, la potasse et la soude y jouant des rôles très différents, et il est nécessaire de les séparer.

Cette opération peut se faire par le calcul. Appelant K le poids de la potasse et N celui de la soude, on a d'abord la relation $N + K = A$.

Mais les sulfates de potasse et de soude sont des sels neutres; donc il y a autant d'équivalents d'acide que de bases. Or, les équivalents respectifs de l'acide sulfurique, de la soude et de la potasse, sont entre eux comme 40, 31 et 47. On a donc :

$$\frac{S}{40} = \frac{N}{31} + \frac{K}{47}.$$

De ces deux relations on peut déduire les deux inconnues N et K.

Ce calcul ne donne pas généralement des résultats très exacts. Les erreurs de pesées se trouvent multipliées dans une forte proportion et peuvent être plus que quadruplées. En effet, si on appelle B le poids du sulfate de baryte que l'on a pesé, on trouve que :

$$N = 1,4469\,B - 1,9375\,R,$$
$$K = 2,9375\,R - 1,7902\,B.$$

D'autre part, on ne peut pas toujours compter sur un résidu absolument neutre. Pendant l'évaporation à sec, il se forme des bisulfates que la calcination ne parvient pas toujours à réduire entièrement. On trouve ainsi presque toujours plus de soude qu'il n'y en a réellement.

Il est préférable de précipiter directement la potasse par le chlorure de platine. Cette opération ne peut pas se faire sur les sels à l'état de sulfates; il faut qu'ils soient à l'état de chlorures. Après avoir fait bouillir avec l'eau de baryte et filtré, on sépare la liqueur en deux parties bien égales, dont l'une est traitée comme il est indiqué ci-dessus et donne la somme A des deux alcalis.

L'autre partie est soumise à un courant d'acide carbonique qui sature la baryte et les alcalis libres. On fait bouillir, pour décomposer les bicarbonates qui ont pu se former, et on filtre. La liqueur ne renferme plus que des chlorures et des carbonates alcalins. On y ajoute un excès d'acide chlorhydrique, on la concentre et on la place dans une capsule avec du bichlorure de platine. On fait évaporer lentement, et quand toute apparence liquide a disparu, sans attendre la dessiccation complète, on traite par l'alcool concentré, additionné d'un peu d'éther, qui dis-

sout le chloroplatinate de soude et non celui de potasse. On filtre, on lave avec de l'alcool concentré et on dessèche.

Le chloroplatinate de potasse est séparé du filtre et pesé. On en déduit par le calcul le poids de la potasse. En outre, comme le filtre a retenu nécessairement quelques parcelles du précipité, on le calcine, et le peu de chloroplatinate qu'il renferme se décompose en chlorure de potassium et en platine métallique. On reprend par l'eau, et on jette sur un autre filtre, qu'on lave avec soin, que l'on calcine et que l'on pèse. Du poids du platine ainsi trouvé, on déduit par les équivalents le poids de potasse à ajouter au précédent.

Quand le précipité de chloroplatinate est peu abondant, on n'essaie pas de le séparer du filtre, et on grille immédiatement celui-ci avec tout son contenu.

Connaissant le poids des alcalis réunis et celui de la potasse, chacun dans la moitié de l'échantillon, on double les résultats, et par différence on a celui de la soude.

Souvent, il n'y a aucun intérêt à savoir la dose de la soude. On se contente alors de déterminer celle de la potasse, en opérant comme il vient d'être indiqué, sur la totalité de la liqueur barytique.

2° Terres et amendements

149. Prise d'échantillon d'une terre. — Lorsqu'on veut connaître la composition d'une pièce de terre, il faut avoir soin d'y prendre des mottes en différents points, de les réunir en tas et de les recouper en tous sens, de façon à avoir un mélange bien homogène, qui représente la composition moyenne du champ. Les mottes

doivent être toutes de même épaisseur et de même surface.

Si c'est le sous-sol que l'on veut étudier, il faut procéder avec les mêmes précautions, après avoir eu soin d'enlever le sol sur la même profondeur partout où l'on veut prendre une motte.

On prélève de ce mélange 1 ou 2 kilogrammes qui sont mis dans un bocal et portés au laboratoire.

C'est du soin extrême apporté à cette prise d'échantillon que dépend, en grande partie, l'utilité de l'analyse.

150. Analyse générale. — On détermine dans les terres le degré d'humidité, comme pour les engrais, par une double dessiccation à l'étuve, successivement sur la matière humide et sur la matière sèche (n° 145).

La matière sèche est broyée dans un mortier et réduite en poudre, que l'on agite pour la rendre bien homogène.

Une partie de cette poudre est brûlée au moufle et réduite en cendres.

L'autre partie est conservée pour le dosage de l'azote, qui se fait exactement comme dans les engrais (n° 146).

L'analyse des cendres est semblable à celle des calcaires. On les attaque par l'acide chlorhydrique, qui laisse un résidu insoluble, puis on traite les liqueurs successives par l'ammoniaque, l'oxalate d'ammoniaque et le phosphate de soude, pour séparer l'alumine et le peroxyde de fer, la chaux et la magnésie (chap. II, § 3).

Les cendres des terres renferment souvent un peu de chlore et d'acide sulfurique, que l'on détermine comme à l'ordinaire (n° 147).

Le sol contient aussi des doses variables d'ammoniaque et d'acide azotique. Si on veut les obtenir, on fait digérer la terre avec de l'eau distillée et on recueille la

liqueur filtrée, sur laquelle on opère comme sur les eaux naturelles.

Il reste, enfin, à doser deux éléments dont la présence dans les terres arables a une grande importance, l'acide phosphorique et la potasse.

151. Dosage de l'acide phosphorique. — Cet élément se rencontre toujours à très faible dose; il faut donc opérer sur une prise d'échantillon considérable, 10 à 20 grammes de cendres par exemple. On les attaque à froid dans une fiole par l'acide chlorhydrique faible, et on filtre. On verse de l'ammoniaque, et on recueille sur un filtre le précipité, que l'on chauffe au rouge vif, dans un creuset de platine, avec un peu de sulfate de soude. L'acide phosphorique se porte sur la soude, pour former un phosphate soluble, tandis que l'alumine et le peroxyde de fer se séparent. On reprend par l'eau et on filtre. Dans la liqueur filtrée, on verse un sel de magnésie et un excès d'ammoniaque. On obtient ainsi un précipité de phosphate ammoniaco-magnésien qui est recueilli et traité comme à l'ordinaire.

152. Dosage des alcalis. — Les alcalis se trouvent dans les terres sous deux états. Une partie, assimilable par les plantes, est immédiatement soluble. On l'obtient en faisant bouillir les cendres avec de l'eau de baryte et traitant la liqueur comme il a été expliqué plus haut (n° 148).

Une autre partie est insoluble et inattaquable par les acides ; c'est celle qui est combinée avec la silice dans les sables provenant des roches primitives, telles que les feldspaths. Sous cet état, les alcalis n'agissent qu'en se décomposant à la longue; il n'y a pas souvent intérêt à

les déterminer. Si on le voulait, toutefois, il faudrait traiter les cendres de la terre au blanc par le carbonate de chaux, comme dans le cas des argiles (n° 90).

153. Lévigation. — La séparation mécanique, au moyen de la lévigation, des divers éléments d'une terre arable, fournit sur sa constitution physique des renseignements fort utiles. C'est une opération très simple qui doit accompagner l'analyse chimique.

On fait bouillir 200 grammes de terre dans une capsule avec 1 litre d'eau distillée, pendant une demi-heure environ ; puis on jette la masse sur une passoire en fer-blanc ou en cuivre, à trous de 1/2 millimètre de diamètre, que l'on place au-dessus d'une terrine ou d'un vase à précipiter de 2 litres au moins de capacité. Si on agite la terre avec une cuiller, l'eau s'écoule et entraîne à travers les trous de la passoire le sable fin et les parties les plus ténues de la terre. On reprend avec la cuiller une partie de l'eau déjà écoulée et on la rejette sur la terre en remuant sans cesse, pour compléter l'entraînement des parties fines. Enfin, on ajoute de l'eau pure sur la masse par petites portions et en agitant toujours, jusqu'à ce que le liquide sorte parfaitement clair de la passoire.

Le mélange resté sur la passoire se compose de gravier plus ou moins gros, de sable moyen et de débris organiques non décomposés. On le jette dans un vase à précipiter et on l'agite avec de l'eau. Les débris organiques surnagent et sont recueillis avec une pince et une petite écumoire. Le sable et le gravier tombent au fond du vase. On les jette sur une seconde passoire dont les trous ont 3 millimètres, et on agite avec de l'eau. Le gravier reste sur la passoire, et le sable moyen est entraîné.

Les débris organiques non décomposés, le sable moyen

et le gravier, séparés comme on vient de le dire, sont recueillis, desséchés et pesés séparément.

Les matières entraînées par l'eau à travers la première passoire se composent de sable fin et de terre proprement dite. On agite circulairement le liquide, on laisse reposer un instant et on décante. Le sable fin reste au fond du vase, et la terre est entraînée par l'eau. On laisse reposer le liquide décanté, et on reverse l'eau claire sur les matières restées dans le premier vase. On agite de nouveau, et on décante une seconde fois après quelques instants de repos. En répétant trois ou quatre fois les opérations précédentes, le départ du sable et de la terre ténue est à peu près complet. On le termine en faisant une dernière décantation avec de l'eau propre. Le sable fin ainsi séparé est desséché et pesé.

La matière ténue entraînée par l'eau est recueillie dans une capsule tarée, où on la pèse après dessiccation.

La terre se trouve ainsi partagée en cinq lots, savoir:

Les débris organiques ;

Les graviers de plus de 3 millimètres de diamètre ;

Le sable moyen de moins de 3 millimètres et de plus de 1/2 millimètre ;

Le sable fin de moins de 1/2 millimètre ;

Les matières ténues et argileuses entraînées par l'eau.

S'il y a une perte de poids, elle provient des matières solubles dans l'eau et de l'humidité propre de la terre.

Les proportions relatives de ces divers lots donnent une idée assez nette des qualités physiques de l'échantillon. Si, par exemple, les matières argileuses dominent, la terre est forte ; si c'est le sable, elle est maigre.

154. Amendements. — Les amendements sont des substances terreuses que l'on introduit dans le sol

pour en modifier les propriétés physiques et chimiques. Leur analyse est la même que celles des terres.

L'un des amendements les plus usuels est la marne. C'est un mélange de carbonate de chaux, d'argile plus ou moins sablonneuse, d'oxyde de fer et de quelques autres substances en proportions relativement assez faibles. La marne de bonne qualité se délite entièrement par l'action de l'air et de l'humidité, et se réduit en poudre impalpable ; la marne de qualité inférieure contient du sable et des noyaux calcaires, sans action chimique immédiate sur le sol. Les marnes sont d'autant plus précieuses, toutes choses égales d'ailleurs, que la quantité de ces matières inertes est moins considérable, et que le carbonate de chaux contenu dans la partie susceptible de se déliter est, au contraire, plus abondant.

L'essai d'une marne se compose donc de deux opérations distinctes : l'analyse chimique, et la détermination par un procédé mécanique de la proportion de ses parties susceptibles de se déliter.

L'analyse chimique d'une marne se fait comme celle des calcaires (chap. II, § 3). Mais il est bon, en outre, d'y doser certains éléments spéciaux, qui y existent presque toujours en petite quantité, il est vrai, mais qui peuvent exercer une influence notable sur la composition du sol, par suite des volumes considérables sous lesquels cet amendement est employé. Ces éléments sont l'acide phosphorique, la potasse et l'azote. On les dose comme dans les terres.

La détermination de la quantité de sable et de noyaux inertes se fait par lévigation. On met dans une terrine ou dans un grand bocal 1 ou plusieurs kilogrammes de morceaux de marne, choisis dans différents points de la carrière ou de la fourniture que l'on veut apprécier. On

ajoute de l'eau et on laisse reposer pendant une heure environ. On agite vivement alors, puis on laisse reposer pendant quelques secondes et on décante le liquide trouble. On ajoute de nouvelle eau claire; on laisse encore reposer pendant une heure et on recommence la même opération, et ainsi de suite, jusqu'à ce que l'eau ne se trouble plus par l'agitation. On recueille alors les noyaux et le sable restés au fond du vase, on les dessèche et on les pèse. La marne est d'autant plus active que leur proportion est moindre.

Si on a recueilli toutes les eaux de lavage de cette lévigation et qu'on les abandonne à elles-mêmes, elles laissent déposer à la longue les boues entraînées qui représentent les parties actives de la marne. On peut alors décanter l'eau claire, dessécher cette boue et en faire l'analyse à part. Cette analyse, comparée à la proportion des parties délitables, donne la valeur réelle et immédiate de la marne.

APPENDICE

EXPOSÉ ET CALCUL DES ANALYSES

Les poids trouvés dans le cours des manipulations ne sont presque jamais ceux qu'il faut inscrire sur les tableaux d'analyse, soit parce que les pesées ont été faites sur des composés définis dont les corps à inscrire sont seulement des éléments, soit parce que les prises d'échantillon ne se sont pas trouvées avoir des poids simples. Il faut, par le calcul, ramener toutes les pesées à un dénominateur commun, qui est, en général, un poids 100 de la matière à examiner.

Les tables qui suivent donnent les moyens de faire rapidement ces calculs. Dans la table I, figurent les équivalents des corps, celui de l'hydrogène étant pris pour unité, et les poids atomiques tels qu'ils sont admis aujourd'hui d'après les recherches les plus récentes et les plus dignes de foi.

La table II donne les coefficients par lesquels doivent être multipliés les poids des produits recueillis et mesurés dans les analyses pour en déduire les poids correspondants des corps que l'on cherche.

Les tables III, IV et V fournissent des nombres tout calculés, dont on fait continuellement usage dans l'analyse des gaz.

TABLE I

Symboles, équivalents et poids atomiques des principaux corps simples

CORPS SIMPLES	SYMBOLE	ÉQUIVALENT	POIDS ATOMIQUE
Aluminium.........	Al	13,75	27
Antimoine	Sb	122	120
Argent	Ag	108	107,8
Arsenic............	As	75	75
Azote..............	Az (N)	14	14
Baryum	Ba	68	137
Bismuth	Bi	210	207,5
Bore	Bo	11	11
Brome.............	Br	80	80
Calcium	Ca	20	40
Carbone	C	6	12
Chlore....	Cl	35,5	35,4
Chrome............	Cr	26	52
Cobalt.............	Co	29,5	58,8
Cuivre.............	Cu	31,75	63,4
Etain.....	Sn	59	118
Fer	Fe	28	56
Fluor.............	Fl	19	19
Hydrogène.........	H	1	1
Iode...............	I	127	126,5
Magnésium	Mg	12	24
Manganèse.........	Mn	27,5	55
Mercure	Hg	100	200
Nickel.............	Ni	29,5	59
Or	Au	98,5	196,2
Oxygène...........	O	8	16
Phosphore	Ph (P)	31	31
Platine	Pt	98,5	194,4
Plomb.............	Pb	103,5	206,4
Potassium	K	39,1	39,1
Silicium	Si	14	28
Sodium............	Na	23	23
Soufre.............	S	16	32
Zinc..............	Zn	32,5	65

TABLE II

Coefficients par lesquels il faut multiplier les poids des corps pesés ou déterminés dans les analyses, pour calculer les poids des corps cherchés.

DÉSIGNATION des CORPS PESÉS OU DÉTERMINÉS	COEFFICIENTS	DÉSIGNATION des CORPS CHERCHÉS
Anhydride azotique	0.2593	Azote.
— —	1.5741	Azote de sodium.
— carbonique	2.4091	Carbonate de sodium.
— —	1.4091	Soude anhydre.
— phosphorique	2.1831	Phosphate neutre de calcium.
— stannique	0.7867	Etain.
— sulfurique	1.5000	Sulfate de magnésium.
— —	0.5000	Magnésie.
— —	0.8875	Chlore.
— —	3.7875	Sulfate de plomb.
— —	1.7000	Sulfate de calcium.
Ammoniaque	0.8235	Azote.
—	3.8823	Sulfate d'ammonium.
Azotate de sodium	0.3647	Soude anhydre.
— —	0.6353	Anhydride azotique.
Azote	1.2143	Ammoniaque.
—	4.2143	Sesquicarbonate d'ammonium.
Carbonate de calcium	0 5600	Chaux.
— —	0.4400	Anhydride carboniqne.
— de magnésium	0.4762	Magnésie.
— —	0.5238	Anhydride carbonique.
— de sodium	0.5849	Soude anhydre.
— —	0.4151	Anhydride cabonique.
Chaux	1.7857	Carbonate de calcium.
—	0.2143	Carbone.
—	0.7145	Calcium.
—	1.2679	Chlore.
—	1.9831	Chlorure de calcium.
—	1.8452	Phosphate neutre de calcium.
—	2.4286	Sulfate de calcium.
Chlore	1.0282	Acide chlorhydrique.
—	2.0986	Chlorure de potassium.
—	1.6479	Chlorure de sodium.
—	0.3380	Magnésium.
—	0.2254	Oxygène.
Chloroplatinate de potassium	0.1938	Potasse anhydre.
Chlorure d'argent	0.2474	Chlore.
— —	0.7526	Argent.
— —	0.2544	Acide chlorhydrique.
— de potassium	0.4765	Chlore.
— —	1.9262	Chlorure d'argent.
— —	0.5235	Potassium.
— —	0.6309	Potasse anhydre.
— de sodium	0.5299	Soude anhydre.
Magnésie	1.7750	Chlore.
—	0.6000	Magnésium.
—	2.3750	Chlorure de magnésium.
Oxyde de cuivre	0.7987	Cuivre.

DÉSIGNATION des CORPS PESÉS OU DÉTERMINÉS	COEFFICIENTS	DÉSIGNATION des CORPS CHERCHÉS
Oxyde rouge de manganèse....	0.7205	Manganèse.
— —	1.1397	Peroxyde de manganèse.
— de plomb	1.1978	Carbonate de plomb.
— —	0.9280	Plomb.
— —	1.0719	Sulfure de plomb.
— de zinc................	0.8025	Zinc.
Peroxyde de fer...............	0.7000	Fer.
— —	0.9000	Protoxyde de fer.
Pyrophosphate de magnésium..	0.6396	Anhydride phosphorique.
— — ..	0.3604	Magnésie.
— — ..	1.3964	Phosphate neutre de calcium.
Platine........................	0.4810	Potasse anhydre.
—	0.7625	Chlorure de potassium.
Potasse anhydre...............	1.4681	Carbonate de potassium.
— —	1.5851	Chlorure de potassium.
— —	2.4189	Azotate de potassium.
— —	0.8298	Potassium.
Potassium.....................	1.2051	Potasse anhydre.
—	1 9103	Chlorure de potassium.
—	2.2308	Sulfate de potassium.
—	1.7692	Carbonate de potassium.
—	2.9872	Sulfate de baryum.
—	1.0257	Anhydride sulfurique.
Sodium	1.3478	Soude anhydre.
—	3.0870	Sulfate de sodium.
—	5.0652	Sulfate de baryum.
—	1.7391	Anhydride sulfurique.
—	0.3478	Oxygène.
Soudre anhydre	0.7419	Sodium.
— —	1.7097	Carbonate de sodium.
— —	1.8871	Chlorure de sodium.
— —	2.2903	Sulfate de sodium.
—	3.7581	Sulfate de baryum.
Soufre	2.5000	Anhydride sulfurique.
—	4.2500	Sulfate de calcium.
—	1.7500	Chaux.
—	7.2813	Sulfate de baryum.
Sulfate de baryum.............	0.3433	Anhydride sulfurique.
— —	0.6567	Baryte.
— —	0.8455	Carbonate de baryum.
— —	0.1888	Anhydride carbonique.
— —	0.0515	Carbone.
— —	0.4291	Carbonate de calcium.
— —	0 1373	Soufre.
— —	0.1202	Azote,
— —	0.4635	Anydride azotique.
— —	0.1460	Ammoniaque.
— de baryum............	0.3047	Acide chlorhydrique.
— de plomb..............	0.6825	Plomb.
— —	0.7354	Oxyde de plomb.
— de potassium..........	0.5402	Potasse anhydre.
— —	0.4598	Anhydride sulfurique.
— —	1.3391	Sulfate de baryum.
Sulfure de cuivre.............	0.3994	Cuivre.
— de plomb..............	0.8657	Plomb.
— —	0.9328	Oxyde de plomb.
— —	1.2684	Sulfate de plomb.
— —	1.1174	Carbonate de plomb.
— de zinc................	0.6701	Zinc.

TABLE III

Tensions de la vapeur d'eau en millimètres de 0°, à + 30°,9

D'après REGNAULT

TEMP.	TENS.	TEMP.	TENS.	TEMP.	TENS.	TEMP.	TENS.	TEMP.	TENS.	TEMP.	TENS.
degrés	millim.	degrés	millim.	degrés	millim.	degrés	millim.	degrés	millim.	degrés	millim.
0.0	4.600	5.2	6.625	10.4	9.412	15.6	13.197	20.8	18.271	26.0	24.988
0.1	4.633	5.3	6.671	10.5	9.474	15.7	13.281	20.9	18 383	26.1	25.138
0.2	4.667	5.4	6.717	10.6	9.537	15.8	13.366	21.0	18.495	26 2	25.288
0.3	4.700	5.5	6.763	10.7	9.601	15.9	13.451	21.1	18.610	26.3	25.438
0.4	4.733	5.6	6.810	10.8	9.665	16.0	13.536	21.2	18.724	26.4	25.588
0.5	4.767	5.7	6 857	10.9	9.728	16.1	13.623	21.3	18.839	26.5	25.738
0.6	4.801	5.8	6.904	11.0	9.792	16.2	13 710	21.4	18.964	26.6	25.891
0.7	4.836	5.9	6.951	11.1	9.857	16.3	13.797	21 5	19.069	26.7	26.045
0 8	4.871	6.0	6.998	11.2	9.923	16.4	13.885	21.6	19.187	26.8	26.198
0.9	4.905	6.1	7.047	11.3	9.989	16.5	13.972	21.7	19.305	26.9	26.351
1.0	4.940	6.2	7.095	11.4	10.054	16.6	14.062	21.8	19.423	27.0	25.505
1.1	7.975	6.3	7.144	11.5	10.120	16.7	14.151	21.9	19.541	27.1	25 663
1.2	5.011	6.4	7.193	11 6	10.187	16.8	14.241	22.0	19.659	26.2	25.820
1.3	5.047	6.5	7 242	11.7	10.255	16 9	14.331	22.1	19.780	27.3	25.978
1.4	5.082	6.6	7.292	11.8	10.322	17.0	14.421	22.2	19.901	27.4	27.136
1.5	5.118	6.7	7.342	11.9	10.389	17.1	14.513	22.3	20.022	27.5	27.294
1.6	5.155	6.8	7.392	12.0	10.457	17.2	14.605	22.4	20 143	27.6	27.455
1.7	5.191	6.9	7.442	12 1	10.526	17.3	14.697	22 5	20 265	27.7	27.617
1.8	5.228	7.0	7.492	12.2	10.596	17.4	14.790	22.6	20.389	27.8	27.778
1.9	5.265	7.1	7.544	12.3	10.665	17.5	14.882	22.7	20.514	27.9	25.939
2.0	5.302	7.2	7.595	12.4	10.734	17.6	14.977	22.8	20.639	28.0	28.101
2.1	5.340	7.3	7.647	12.5	10.804	17.7	15.072	22.9	30 763	28.1	28.267
2.2	5.378	7.4	7.699	12.6	10.875	17.8	15.167	23.0	20.888	28.2	28.433
2.3	5.416	7.5	7.751	12.7	10.947	17.9	15.262	23.1	21.016	28.3	28.599
2.4	5.454	7.6	7.804	12.8	11.019	18.0	15.357	22.2	21.144	28.4	28.765
2.5	5.491	7.7	7.857	12.9	11.090	18.1	15.454	23.3	21.272	28.5	28.931
2.6	5.530	7.8	7.910	13.0	11.162	18.2	15.552	23.4	21.400	28.6	29.101
2.7	5.569	7.9	7.964	13.1	11.235	18.3	15.650	23 5	21.528	28.7	29.271
2.8	5.608	8.0	8.017	13.2	11.309	18.4	15.747	23.6	21.659	28 8	29.441
2.9	5.647	8.1	8 072	13.3	11.383	18.5	15.845	23.7	21.790	28.9	29.612
3.0	5.687	8.2	8.126	13.4	11.456	18.6	15.945	23.8	21.921	29.0	29.782
3.1	5.727	8.3	8.181	13.5	11.530	18.7	16 045	23.9	22.053	29.1	29.956
3.2	5.767	8.4	8.236	13.6	11.605	18.8	16.145	24.0	22.184	29.2	30.131
3.3	5.807	8.5	8.291	13.7	11.681	18.9	16.246	24.1	22.319	29.3	30.305
3.4	5.848	8.6	8.347	13.8	11.757	19.0	16.346	24.2	22.453	29.4	30 479
3.5	5.889	8.7	8.404	13 9	11.834	19.1	16.449	24.3	22.588	29.5	30.654
3.6	5.930	8.8	8.461	14.0	11.910	19.2	16.552	24 4	22.723	29 6	30.833
3.7	5.972	8.9	8.517	14.1	11.988	19.3	16.655	24.5	22.858	29.7	31.011
3.8	6.014	9.0	8.574	14.2	12.064	19.4	16.758	24.6	22.996	29.8	31.190
3.9	6.055	9.1	8.632	14.3	12.142	19.5	16.861	24.7	23.135	29.9	31.369
4.0	6.097	9.2	8.690	14.4	12.220	19.6	16.967	24.8	23.273	30.0	31.548
4.1	6.140	9.3	8.748	14.5	12.298	19.7	17.073	24.9	23.411	30.1	31.729
4.2	6.183	9.4	8.807	14.6	12.378	19.8	17.179	25.0	23.550	30.2	31.911
4.3	6.226	9.5	8.865	14.7	12.458	19.9	15.285	25.1	23.692	30 3	32.094
4.4	6.270	9.6	8.925	14.8	12.538	20.0	17.391	25.2	23 834	30.4	32.278
4.5	6.313	9.7	8.985	14.9	12.619	20.1	17.500	25.3	23.976	30.5	32.463
4.6	6.357	9.8	9.045	15.0	12.699	20.2	17.608	25.4	24.119	30.6	32.650
4.7	6.401	9.9	9.105	15.1	12.781	20.3	17.717	25.5	24.261	30.7	32.837
4.8	6.445	10.0	9.165	15.2	12.864	20.4	17.826	25.6	24.406	30.8	33.026
4.9	6.490	10.1	9.227	15.3	12.947	20.5	17.935	25.7	21.552	30.9	33.215
5.0	6.534	40.2	9.288	15.4	13.029	20.6	18.047	25 8	24.697		
5.1	6.580	10.3	9.350	15.5	13.112	20.7	18.159	25.9	24.842		

TABLE IV

Réduction à 0° des hauteurs du baromètre à échelle gravée sur verre

HAUT.	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°
mm.	millim.	millim.	millim.	millim.	millim.	millim.	millim.	millim.	millim.
5	0.00085	0.00171	0.00256	0.00342	0.00428	0.00513	0.00599	0.00684	0.00770
10	0.00171	0.00342	0.00513	0.00684	0.00856	0.01027	0.01198	0.01369	0.01540
15	0.00256	0.00513	0.00769	0.01026	0.01284	0.01540	0.01797	0.02053	0.02310
20	0.00342	0.00684	0.01029	0.01368	0.01712	0.02054	0.02396	0.02738	0.03080
25	0.00427	0.00855	0.01283	0.01710	0.02139	0.02567	0.02995	0.03422	0.03850
30	0.00513	0.01026	0.01540	0.02052	0.02567	0.03080	0.03593	0.04107	0.04620
35	0.00598	0.01197	0.01797	0.02394	0.02995	0.03594	0.04192	0.04791	0.05390
40	0.00684	0.01368	0.02053	0.02736	0.03423	0.04107	0.04791	0.05476	0.06160
45	0.00769	0.01539	0.02310	0.03078	0.03850	0.04620	0.05390	0.06160	0.06930
50	0.00855	0.01711	0.02567	0.03422	0.04278	0.05133	0.05989	0.06844	0.07700
55	0.00940	0.01882	0.02824	0.03764	0.04706	0.05646	0.06588	0.07528	0.08470
60	0.01026	0.02053	0.03080	0.04106	0.05134	0.06160	0.07187	0.03212	0.09240
65	0.01111	0.02224	0.03337	0.04449	0.05562	0.06673	0.07786	0.08897	0.10010
70	0.01197	0.02395	0.03593	0.04791	0.05990	0.07187	0.08385	0.09582	0.10780
75	0.01282	0.02567	0.03850	0.05153	0.06417	0.07700	0.08983	0.10266	0.11550
80	0.01368	0.02738	0.04106	0.05476	0.06845	0.08213	0.09582	0.10951	0.12320
85	0.01453	0.02909	0.04363	0.05818	0.07273	0.08727	0.10181	0.11635	0.13090
90	0.01539	0.03080	0.04619	0.06160	0.07701	0.09240	0.10780	0.12320	0.13860
95	0.01625	0.03251	0.04876	0.06502	0.08129	0.09753	0.11378	0.13004	0.14630
100	0.01711	0.03422	0.05133	0.06844	0.08555	0.10266	0.11977	0.13688	0.15399
105	0.01796	0.03593	0.05390	0.07166	0.08983	0.10779	0.12576	0.14372	0.16169
110	0.01882	0.03764	0.05646	0.07528	0.09411	0.11293	0.13175	0.15057	0.16339
115	0.01967	0.03935	0.05903	0.07871	0.09839	0.11806	0.13774	0.15741	0.17709
120	0.02053	0.04106	0.06160	0.08213	0.10266	0.12320	0.14372	0.16426	0.18479
125	0.02138	0.04278	0.06416	0.08555	0.10694	0.12833	0.14971	0.17110	0.19248
130	0.02224	0.04449	0.06673	0.08898	0.11122	0.13346	0.15570	0.17795	0.20018
135	0.02309	0.04620	0.06929	0.09240	0.11549	0.13860	0.16169	0.18479	0.20788
140	0.02395	0.04791	0.07186	0.09582	0.11977	0.14374	0.16767	0.19164	0.21558
145	0.02480	0.04962	0.07442	0.09924	0.12405	0.14887	0.17366	0.19848	0.22328
150	0.02666	0.05133	0.07699	0.10266	0.12832	0.15399	0.17965	0.20532	0.23098
155	0.02658	0.05304	0.07956	0.10608	0.13260	0.15912	0.18564	0.21216	0.23868
160	0.02737	0.05475	0.08212	0.10950	0.13688	0.16426	0.19163	0.21901	0.24638
165	0.02822	0.05646	0.08469	0.11293	0.14116	0.16939	0.19762	0.22585	0.25408
170	0.02908	0.05817	0.08726	0.11635	0.14543	0.17453	0.20361	0.23270	0.26178
175	0.02994	0.05989	0.08982	0.11977	0.14971	0.17966	0.20959	0.23954	0.26948
180	0.03079	0.06160	0.09239	0.12320	0.15399	0.18479	0.21553	0.24639	0.27718
185	0.03165	0.06331	0.09495	0.12662	0.15827	0.18993	0.22157	0.25323	0.28488
190	0.03250	0.06502	0.09752	0.13004	0.16254	0.19506	0.22756	0.26008	0.29258
195	0.03336	0.06673	0.10008	0.13346	0.16682	0.20019	0.23355	0.26692	0.30028
200	0.03422	0.06844	0.10266	0.13688	0.17110	0.20532	0.28954	0.27376	0.30798
205	0.03507	0.07015	0.10523	0.14030	0.17538	0.21045	0.24553	0.28060	0.31568
210	0.03593	0.07186	0.10779	0.14372	0.17966	0.21559	0.25152	0.28745	0.32338
215	0.03678	0.07357	0.11036	0.14715	0.18394	0.22072	0.25751	0.29429	0.33108
220	0.03764	0.07528	0.11293	0.15057	0.18821	0.22586	0.26349	0.30114	0.33878
225	0.03849	0.07700	0.11549	0.15399	0.19249	0.23099	0.26948	0.30798	0.34647
230	0.03935	0.07871	0.11805	0.15742	0.19677	0.23612	0.27547	0.31483	0.35417
235	0.04020	0.08042	0.12062	0.16084	0.20105	0.24126	0.28145	0.32167	0.36187
240	0.04106	0.08213	0.12318	0.16426	0.20532	0.24639	0.28744	0.32852	0.36957
245	0.04191	0.08384	0.12575	0.16768	0.20960	0.25152	0.29343	0.33536	0.37727
250	0.04277	0.08555	0.12832	0.17110	0.21387	0.25665	0.29942	0.34220	0.38497

HAUT.	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°
mm.	millim.	millim,	millim.	millim.	millim.	millim.	millim.	millim.	millim.
255	0.04362	0.08756	0.13089	0.17452	0.21815	0.26178	0 30451	0.34904	0.39627
260	0.04448	0.08897	0.13345	0.17794	0.22243	0.26692	0.31140	0.35589	0.40037
265	0.04534	0.09068	0.13601	0.18137	0.22671	0 27205	0.31739	0.36273	0.40807
270	0.04619	0.09239	0.13858	0.18479	0.23098	0.27719	0.32338	0.36958	0.41577
275	0.04705	0.09411	0.14115	0.18821	0.23526	0.28232	0.32936	0.37642	0.42342
280	0.04790	0.09582	0.14371	0.19164	0.23954	0.28745	0.33535	0.38327	0.43117
285	0.04876	0.09753	0.14628	0.19506	0.24381	0.29259	0.34134	0.39011	0.43887
290	0.04961	0.09924	0 14884	0.19848	0.24809	0.29772	0.34733	0.39696	0.44657
295	0.05047	0.10095	0.15141	0.20190	0.25237	0.30285	0.35332	0.40380	0.45427
300	0.05133	0 10266	0.15399	0.20532	0.25665	0.30798	0.35931	0.41064	0.46197
305	0.05218	0.10437	0.15656	0.20874	0.26093	0.31311	0 36530	0.41748	0.46967
310	0.05304	0.10608	0.15912	0.21216	0.26521	0.31825	0.37129	0 42433	0.47737
315	0.05389	0 10779	0.16169	0.21559	0.26949	0.32338	0.37728	0.43117	0.48507
320	0.05475	0.10952	0.16426	0.21901	0.27376	0.32852	0.38326	0.43802	0.49277
325	0.05560	0.11122	0.16682	0.22243	0.27804	0.33365	0.38925	0.44486	0.50046
330	0.05646	0.11293	0.16939	0.22586	0.28232	0.33878	0.39524	0.45171	0.50816
335	0.05731	0.11464	0.17195	0.22928	0.28659	0 34392	0.40122	0.45855	0.51856
340	0.05817	0.11635	0.17452	0.23270	0.29087	0.34905	0.40721	0.46540	0.52356
345	0.05902	0.11806	0.17708	0.23612	0.29515	0.35418	0.41320	0.47224	0.53126
350	0.05988	0.11977	0.17965	0.23954	0.29942	0.35931	0.41919	0.47908	0.53896
355	0.06074	0.12148	0 18222	0.24296	0.30370	0.36444	0.42518	0.48592	0.54666
360	0.06159	0.12319	0.18478	0.24638	0.30798	0.36958	0.43117	0.49277	0.55436
365	0.06245	0.12490	0.18735	0.24981	0.31226	0.37471	0.43716	0.49961	0.56206
370	0.06330	0.12662	0.18992	0.25323	0.31653	0.37985	0.44315	0.50646	0.56976
375	0.06416	0.12833	0.19248	0.25665	0.32081	0.38498	0.44913	0.51330	0.57746
380	0 06501	0.13004	0.19505	0.26008	0.32509	0.39811	0.45512	0.52015	0.58516
385	0.06587	0.13175	0 19761	0.26350	0.32937	0.39525	0.46111	0.52699	0.59286
390	0 06672	0.13346	0.20018	0.26692	0 32364	0.40038	0.46710	0.53384	0.60056
395	0.06758	0.13517	0.20274	0.27034	0.33792	0 40552	0.47309	0.54068	0.60826
400	0.06844	0.13688	0.20532	0.27376	0.34220	0.41064	0.47908	0.54752	0.61596
405	0.06929	0.13859	0.20789	0.27718	0.34643	0.41577	0.43507	0.55436	0.62366
410	0.07015	0.14030	0.21045	0 28060	0.35076	0.42091	0 49106	0.56121	0.63136
415	0.07100	0.14201	0.21302	0.28403	0.35504	0.42604	0.49705	0.56805	0.63906
420	0.07186	0.14373	0.21559	0.28745	0.35931	0.43418	0.50303	0.57490	0.64676
425	0.07271	0.14544	0.21815	0 29087	0.36359	0.43631	0 50902	0.58174	0.65445
430	0.07357	9.14715	0.22072	0.29430	0.36787	0.44144	0 51501	0.58859	0.66215
435	0.07442	0.14886	0.22328	0.30114	0.37215	0.44658	0.52099	0.59543	0.66985
440	0.07528	0.15057	0 22535	0.29772	0.37642	0.45171	0.52698	0.60228	0.67755
445	0.07613	0.15228	0.22341	0.30456	0.38070	0.45384	0.53297	0.60912	0.68525
450	0.07699	0.15399	0.23098	0.30798	0.38497	0.46197	0.53896	0.61596	0.69295
455	0.07785	0.15570	0.23355	0.31140	0.38925	0.46710	0.54495	0.62280	0.70065
460	0.07870	0.15741	0.23612	0.31482	0.39353	0.47224	0.55094	0.62965	0.70835
465	0.07956	0.15912	0.23868	0.31825	0.39781	0.47737	0.55693	0.63649	0.71605
470	0.08041	0.16084	0.24125	0.33167	0.40208	0.48251	0.56292	0.64335	0.72375
275	0.08127	0.16255	0.24382	0.32509	0.40636	0.48764	0.56890	0.65018	0.73145
480	0.08212	0.16426	0.24638	0 32852	0.41064	0.49277	0.57489	0.65703	0.73915
485	0.08298	0.16597	0.24895	0.33194	0.41491	0.49791	0.58088	0.66387	0.74685
490	0.08383	0.16768	0.25151	0.33536	0.41919	0.50304	0.58687	0.67072	0.75455
495	0.08469	0.16939	0.25408	0.33878	0.42347	0.50817	0.59286	0.67756	0.76225
500	0.08555	0.17110	0.25665	0.34220	0.42775	0.51330	0.59885	0.68440	0.76995
505	0.08640	0.17281	0.25922	0.34562	0.43203	0.51843	0.60484	0.69124	0.77765
410	0.08726	6.17452	0.26178	0.34904	0.43631	0.52357	0.61083	0.69809	0.78535
515	0.08811	0.17623	0.26435	0.35247	0.44059	0.52870	0.61682	0.70493	0.79305
520	0.08897	0.17795	0.26692	0.35589	0.44486	0.53384	0.62280	0.71178	0.80075
525	0.08982	0.17966	0.26948	0.35931	0.44914	0.53897	0.62879	0.71862	0.80844
530	0.09063	0.18137	0.27205	0.36274	0.45342	0.54410	0.63478	0.72547	0.81614
535	0.09153	0.18308	0.27461	0.36616	0.45769	0.54924	0.64076	0.73231	0.82384
540	0.09239	0.18479	0.27718	0.36958	0.46197	0.55437	0.64675	0.73916	0.83154
545	0.09324	0.18650	0.27974	0.37300	0.46625	0.55950	0.65274	0.74600	0.83924
550	0.09410	0.18821	0.28231	0.37642	0.47052	0.56463	0.65873	0.75284	0.84694

HAUT.	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°
mm.	millim.	millim.	millim.	millim.	millim.	millim.	millim.	millim.	millim.
555	0.09496	8.18992	0.28488	9.37984	0.47480	0.56976	0.66472	0.75998	0.85464
560	0.09581	0.19163	0.28745	0.38326	0.47908	0.57490	0.67071	0.76633	0.86234
565	0.09667	0.19334	0.29001	0.38669	0.48336	0.58003	0.67670	0.77337	0.87004
570	0.09752	0.19506	0.29258	0.39011	0.48763	0.58517	0.68269	0.78022	0.87774
575	0.09838	0.19677	0.29514	0.39353	0.49191	0.59030	0.68867	0.78706	0.88544
580	0.09923	0.19848	0.29771	0.39696	0.49619	0.59543	0.69466	0.79391	0.89314
585	0.10009	0.20019	0.30027	0.49038	0.50047	0.60057	0.70065	0.80075	0.90084
590	0.10094	0.20190	0.30284	0.40380	0.50474	0.60570	0.70664	0.80760	0.90854
595	0.10180	0.20361	0.30540	0.40722	0.50962	0.61083	0.71263	0.81444	0.91624
600	0.10266	0.20532	0.30798	0.41064	0.51330	0.61596	0.71862	0.82128	0.92394
605	0.11035	0.20703	0.31055	0.41406	0.51758	0.62109	0.72461	0.82812	0.93164
610	0.10437	0.20874	0.31300	0.41748	0.52186	0.62623	0.73069	0.83497	0.93934
615	0.10522	0.21045	0.31568	0.42091	0.52614	0.63136	0.73659	0.84181	0.94704
620	0.10608	0.21217	0.31825	0.42433	0.53041	0.63650	0.74257	0.84866	0.95474
625	0.10693	0.21338	0.32081	0.42775	0.53469	0.64163	0.74856	0.85550	0.96243
630	0.10779	0.21559	0.32337	0.43118	0.53897	0.64676	0.75455	0.86235	0.97013
635	0.10864	0.21730	0.32594	0.43460	6.54324	0.65190	0.76053	0.86919	0.97783
640	0.10950	0.21937	0.32850	0.43802	0.54752	0.65703	0.76652	0.87604	0.98553
645	0.11035	0.22072	0.33107	0.44144	0.55180	0.66216	0.77251	0.88288	0.99323
650	0.11121	0.22243	0.33864	0.44486	0.55607	0.66729	0.77850	0.88972	1.00093
655	0.11207	0.22414	0.33621	0.44828	0.56035	0.67242	0.78449	0.89656	1.00863
660	0.11292	0.22585	0.33877	0.45170	0.56463	0.67756	0.79048	0.90341	1.01633
665	0.11378	0.22756	0.34134	0.45513	0.57891	0.68269	0.79647	0.91025	1.02403
670	0.11463	0.22928	0.34391	0.45855	0.57318	0.68783	0.80246	0.91710	1.03173
675	0.11549	0.23099	0.34647	0.46197	0.57746	0.69296	0.80844	0.92394	1.03943
680	0.11634	0.23270	0.34904	0.46540	0.58174	0.69809	0.81443	0.93079	1.04713
685	0.11720	0.23441	0.35160	0.46882	0.58602	0.70323	0.82042	0.93763	1.05483
690	0.11805	0.23612	0.35417	0.47224	0.59029	0.70836	0.82641	0.94448	1.06253
695	0.11891	0.23783	0.35673	0.47566	0.59457	0.71349	0.83240	0.95132	1.07023
700	0.11977	0.23954	0.35931	0.47908	0.59885	0.71862	0.83839	0.95816	1.07793
705	0.12062	0.24125	0.36188	0.48250	0.60313	0.72375	0.84438	0.96500	1.08563
710	0.12143	0.24296	0.36444	0.48592	0.60741	0.72889	0.85037	0.97185	1.09333
715	0.12233	0.24467	0.36701	0.48935	0.61169	0.73402	0.85636	0.97869	1.10103
720	0.12319	0.24639	0.36958	0.49277	0.61596	0.73916	0.86234	0.98554	1.10873
725	0.12404	0.24810	0 37214	0.49619	0.62024	0.74429	0.86639	0.99238	1 11642
730	0.12490	0.24981	0 37471	0.49962	0.62452	0.74942	0.87432	0.99923	1.12412
735	0.12575	0.25152	0.37727	0.50304	0.62880	0.75456	0.88030	1.00607	1.13182
740	0.12661	0.25323	0.37984	0.50646	0.63307	6.75969	0.88623	1.01292	1.13952
745	0.12746	0.25494	0.38240	0.50988	0 63735	0.76482	0 89228	1.01976	1.14722
750	0.12832	0.25665	0.38497	0.51330	0.64162	0.76995	0.89827	1.02660	1.15492
755	0.12918	0.25836	0.38754	0.51672	0.64590	0.77508	0.90426	1.03344	1 16262
760	0.13003	0.26007	0.39011	0.52014	0.65018	0.78022	0.91025	1.04029	1.17032
765	0.13089	0.26178	0.39267	0.52357	0.65446	0.78535	0 91624	1.04713	1.17802
770	0.13174	0.26350	0.39524	0.52699	0.65873	0.79049	0 92223	1.05398	1.18572
775	0.13260	0.26521	0.39781	0.53041	0.66301	0.79562	0.92821	1.06082	1.19342
780	0.13345	0.26692	0.40037	0.53383	0.66729	0.80075	0.93420	1.06767	1.20112
785	0.13431	0.26863	0.40294	0.53725	0.67157	0.80589	0.94019	1.07451	1.20882
790	0.13516	0.27034	0.40550	0.54067	0.67584	0.81102	0.94618	1.08136	1.21652
795	0.13602	0.27205	0.40707	0.54409	0.68012	0.81615	0.95217	1.08820	1.22422
800	0.13688	0.27376	0.41064	0.54752	0.68440	0.82128	0.95816	1.09504	1.23192

EXEMPLE

Soit à réduire à 0° une observation ayant donné une hauteur de 556^{mm},7 à la température 17°,4. On cherche dans la première colonne le nombre immédiatement inférieur à 556^{mm},7, qui est 555, et on additionne les corrections suivantes prises sur la table :

Pour 10° 0,9436
— 7° 0,6647
— 0°,4 0,0380
Total .... 1,6523 soit 1^{mm},65

La hauteur à 0° est 556^{m},7 — 1^{mm},65 = 555^{mm},05.

TABLE V

Valeurs de $\frac{1}{(1 + 0,00367\,t.)\ 0.760}$, de 0° à 35°

TEMP. t.	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	1.31578	1.31530	1.31482	1.31434	1.31386	1.31337	1.31289	1.31241	1.31193	1.31145
1	1.31097	1.31049	1.31002	1.30954	1.30906	1.30858	1.30810	1.30763	1.30715	1.30667
2	1.30620	1.30572	1.30525	1.30477	1.30430	1.30382	1.30335	1.30287	1.30240	1.30193
3	1 30146	1.30098	1.30051	1.30004	1.29957	1.29910	1.29863	1.29816	1.29769	1.29732
4	1.29675	1.29628	1.29581	1.29534	1.29487	1.29441	1.29394	1.29347	1.29301	1.29254
5	1.29207	1.29161	1.29114	1.29068	1.29021	1.28975	1.28929	1.28882	1.28836	1.28790
6	1.28744	1.28697	1.28651	1.28605	1.28559	1.28513	1.28467	1.28421	1.28375	1.28329
7	1.28283	1.28237	1.28191	1.28155	1.28100	1.28054	1.28008	1.27962	1.27917	1.27871
8	1.27825	1.27780	1.27734	1.27689	1.27643	1.27596	1.27553	1.27507	1.27462	1.27417
9	1.27371	1.27326	1.27201	1.27236	1.27191	1.27146	1.27100	1.27055	1.27010	1.26965
10	1.26920	1.26876	1.26831	1.26786	1.26741	1.26696	1.26651	1.26607	1.26562	1.26517
11	1.26473	1.26428	1.26384	1.26339	1.26294	1.26250	1.26206	1.26161	1.26117	1.26072
12	1.26028	1.25984	1.25940	1.25895	1.25851	1.25807	1.25763	1.25719	1.25675	1.25631
13	1.25587	1.25543	1.25499	1.25455	1.25411	1.25367	1.25323	1.25279	1.25236	1.25192
14	1.25148	1.25105	1.25061	1.25017	1.24971	1.24930	1.24887	1.24843	1.24800	1.24751
15	1.24713	1.24670	1.24626	1.24583	1.24540	1.24496	1.24453	1.24410	1.24367	1.24324
16	1.24281	1.24238	1.24195	1.24151	1.24109	1.24065	1.24023	1.23980	1.23937	1.23994
17	1.23851	1.23809	1.23766	1.23723	1.23680	1.23638	1.23595	1.23553	1.23510	1.23467
18	1.23435	1.23383	1.23340	1.23928	1.23255	1.23213	1.23171	1.23128	1.23086	1 23044
19	1.23002	1.22959	1.22917	1.22875	1.22833	1.22791	1.22749	1.22707	1.22663	1.22623
20	1.22581	1.22539	1.22497	1.22455	1.22414	1.22372	1.22330	1.22288	1.22247	1.22205
21	1.22163	1.22122	1.22080	1.22059	1.21997	1.21955	1.21914	1.21873	1.21831	1.21790
22	1.21748	1.21707	1.21666	1.21625	1.21583	1.21542	1 21501	1.21460	1.21419	1.21377
23	1.21336	1.21295	1.21254	1.21123	1.21172	1.21131	1.21091	1.21050	1.21009	1.20968
24	1.20927	1.20886	1.20846	1.20805	1.20764	1.20724	:.20683	1.20642	1.20602	1.20561
25	1.20521	1.20480	1.20440	1.20399	1.20359	1.20318	1.20278	1.20238	1.20197	1.20157
26	1.20117	1.20077	1.20036	1.19996	1.19956	1.19916	1.19876	1.19836	1.19796	1.19756
27	1.19716	1.19676	1.19636	1.19596	1.19556	1.19516	1.19476	1.19436	1.19397	1.19357
28	1.19317	1.19277	1.19238	1.19198	1.19159	1.19119	1.19080	1.19040	1.19001	1.18961
29	1.18922	1.18882	1.18843	1.18803	1.18764	1.18725	1.18685	1.18646	1.18607	1.18568
30	1.18528	1.18489	1.18450	1.18411	1.18372	1.18333	1.18294	1.18255	1.18216	1 18177
31	1.18138	1.18099	1.18060	1.18021	1.17982	1.17944	1.17905	1.17866	1.17827	1.17788
32	1.17750	1.17711	1.17633	1.17644	1.17595	1.17557	1.17518	1.17480	1.17441	1.17403
33	1.17364	1.17329	1.17288	1.17249	1.17211	1.17173	1.17134	1.17096	1.17058	1.17020
34	1.16982	1.16943	1.16905	1.16867	1.16829	1.16791	1.16753	1.16715	1.16677	1.16639
35	1.16601	1.16453	1.16525	1.16487	1.16450	1.16412	1.16374	1.16336	1.16298	1.16261

SECONDE PARTIE

ÉTUDE SPÉCIALE

DES

MATÉRIAUX D'AGRÉGATION

DES MAÇONNERIES

INTRODUCTION

En abordant l'étude générale des matériaux d'agrégation des maçonneries, qui a déjà servi de thème à d'assez nombreux ouvrages, nous n'avons eu d'autre but que de compléter par un résumé des principales connaissances qu'un ingénieur doit posséder sur ces matières, le *Traité de Chimie appliquée* de MM. Durand-Claye et Derome.

Loin de méconnaître la valeur didactique de ces diverses publications, nous y avons, au contraire, puisé une partie des éléments qui nous étaient nécessaires, en nous efforçant seulement de les présenter sous une forme quelque peu différente, contrôlés, pour la plupart, par notre propre expérience et augmentés des principales connaissances nouvellement acquises au sujet de ces matériaux qui prennent tous les jours une importance croissante et font l'objet de recherches de plus en plus nombreuses.

En particulier, la question de la fabrication s'augmente continuellement de données nouvelles, par suite du perfectionnement progressif des méthodes et des appareils employés dans l'industrie des chaux et ciments. De même, l'étude de ces produits et des moyens de mettre leurs propriétés en évidence a reçu en France, depuis trois ou quatre ans, grâce surtout aux travaux de la Commission officielle des Méthodes d'Essai des Matériaux de Construction, une impulsion toute particulière qui s'est manifestée par des recherches variées sur les diverses questions se rattachant à ces matières. Enfin, en ce qui concerne la composition des mortiers et des bétons, de récents travaux personnels, qui se poursuivent d'ailleurs encore actuellement, nous ont permis de présenter quelques aperçus nouveaux propres à guider l'ingénieur dans le choix des matériaux et des dosages.

Nous nous sommes limité, dans les cinq premiers cha-

pitres, à l'étude exclusive des matériaux d'agrégation proprement dits, c'est-à-dire des éléments qui, dans les maçonneries, jouissent d'une activité propre, tels que la chaux, le ciment, le plâtre, les pouzzolanes, etc., considérés en eux-mêmes, abstraction faite de l'influence des matières inertes qu'on leur mélange ordinairement. C'est seulement dans les derniers chapitres, après avoir passé une revue générale des propriétés intrinsèques de ces produits, que nous avons abordé l'examen des composés, mortiers et bétons, qu'ils fournissent avec le sable et les pierrailles, composés par lesquels on a coutume de les introduire dans la pratique.

Nous donnons ci-dessous une liste, certainement fort incomplète, d'ouvrages ayant déjà, depuis une quinzaine d'années, embrassé l'ensemble ou au moins une grande partie de ces diverses questions. D'autres, extrêmement nombreux, se sont plus spécialement étendus sur l'étude de tel ou tel point particulier; nous avons cité, au cours de chaque chapitre, ceux où le lecteur pourra trouver le plus de détails sur tel sujet qu'il désirerait étudier de plus près que nous n'avons pu le faire dans notre exposé nécessairement succinct en raison même de sa généralité.

GILLMORE, *Practical treatise of limes, hydraulic cements and mortars.* — New-York, 1879.

GRANT, *Portland Cement; its Nature, Tests and Uses.* Minutes of proceedings of the Institution of Civil Engineers, vol. LVII. Londres, 1880.

BRULL, *Etude sur les qualités du ciment de Portland.* Paris, 1882.

BARREAU, *Etude sur les qualités et essais des Ciments à prise lente dits portland* (*Ann. des Ponts et Chaussées*, août 1882).

DUQUESNAY, *Calcaires, Chaux, Ciments, Mortiers.* Encycl. Chimique, 1883.

FAIJA, *Portland Cement for users.* Londres, 1884 (2e édition).

DENFER, *Maçonnerie* (Chap. XI : *Chaux et Ciments;* Chap. XII, *Plâtre*). Encycl. des Trav. publics, 1885.

DURAND-CLAYE, *Chimie appliquée à l'art de l'ingénieur* (2e *partie*), 1re édition, 1885.

DURAND-CLAYE, LE CHATELIER, BONNAMI et DEBRAY, *Mémoire général sur les Chaux, Ciments et Mortiers, présenté au Congrès international des Procédés de Construction de Paris en* 1889.

CANDLOT, *Ciments et Chaux hydrauliques. — Fabrication, Propriétés, Emploi.* Paris, 1891.

ASSOCIATION DES FABRICANTS DE CIMENT PORTLAND ALLEMANDS, *Der Portland Cement und seine Anwendungen im Bauwesen.* Berlin, 1892.

GRANGE, *Chaux et Sels de chaux appliqués à l'art de l'ingénieur.* Paris, 1894.

CHAPITRE PREMIER

HISTORIQUE

§ 1. — Découverte et développement progressif des produits hydrauliques

1. Mortiers antiques. — Introduits déjà par les Égyptiens dans les joints de leurs immenses édifices, les mortiers de chaux ont été appliqués par les Grecs à des usages plus variés.

A la suite de ces peuples, les Romains, les seuls dont les écrits sur la matière soient arrivés jusqu'à nous, ont fait, dans leurs constructions, un emploi courant de la chaux, dont ils paraissent avoir connu les principales propriétés. C'est ainsi que saint Augustin décrit, dans sa *Cité de Dieu*, les phénomènes qui accompagnent l'extinction de la chaux vive, et que Pline et Vitruve traitent dans leurs ouvrages des différents modes d'application dont elle était susceptible. Toutefois, ils n'ont pas su distinguer la chaux grasse de la chaux maigre, et on peut même se demander s'ils ont jamais connu cette dernière.

Sans nous arrêter à la description de mélanges bizarres, tels que la « Maltha » où entraient de la chaux éteinte dans du vin, du saindoux et des figues, et qu'on devait appliquer sur des surfaces préalablement huilées (Pline), nous signalerons seulement un usage par lequel Pline expliquait, non sans raison, la bonne tenue des enduits fabriqués avant lui, et en vertu duquel les anciennes lois défendaient aux entre-

preneurs d'employer la chaux avant qu'elle eût trois ans de fusion.

En plus du sable, et parfois même à l'exclusion de ce dernier, ils incorporaient la plupart du temps dans la chaux de menus morceaux de terre cuite ou des cendres volcaniques provenant de la ville de Pouzzoles, au pied du Vésuve, et qu'ils appelaient *pulvis putolaneus*. Ces matières, surtout la dernière, rendaient les mortiers capables de durcir sous l'eau, ce que Pline et Sénèque signalent avec une admiration exagérée. De là le nom de *pouzzolanes* qui est resté aux divers composés naturels ou artificiels jouissant des mêmes propriétés hydraulisantes.

Tels étaient les seuls matériaux d'agrégation dont les Romains disposaient pour leurs maçonneries ; aussi est-ce à tort qu'on leur a attribué de tout temps le secret de mélanges assurant à celles-ci des durées illimitées. En réalité, ceux de leurs ouvrages qui ont subsisté jusqu'à nous se seraient très probablement comportés de même sans le mortier employé à les édifier, témoin les immenses constructions en pierres sèches qui existent encore, et rien ne prouve que la proportion de nos ouvrages modernes qui resteront debout dans vingt siècles ne dépassera pas notablement celle des maçonneries antiques actuellement subsistantes.

Depuis longtemps, Arago a, dans un rapport à la Chambre des députés, fait justice de ce préjugé attribuant aux compositions des Romains une supériorité mystérieuse sur les mortiers modernes.

2. Premiers progrès. — Il faut sauter brusquement jusqu'au milieu du XVIIIe siècle pour voir apparaître une notion vraiment nouvelle touchant les matériaux de liaison des maçonneries.

En 1756, pendant la construction du phare d'Eddystone, l'ingénieur anglais Smeaton reconnut que la cuisson de certains calcaires légèrement argileux donnait des chaux jouissant, dans une certaine mesure, de la propriété de faire prise sous l'eau. Mais son observation passa à peu près inaperçue, et ce n'est que plus tard qu'on en apprécia l'importance.

Pendant quelques années encore, aucune découverte saillante ne se fit jour, et on doit se borner à citer diverses tentatives de perfectionnement des mortiers basées surtout, comme celles de Loriot (1775), de La Faye (1777) et d'Higgins (1790), sur le mode d'extinction de la chaux, sur les proportions de sable ou de matières pouzzolaniques introduites, ou sur des tours de main relatifs au gâchage ou à l'application de ces mélanges.

Cependant, l'esprit de recherche se développant, on commençait à s'inquiéter des causes premières de l'hydraulicité constatée pour certaines chaux. Le Suédois Bergmann l'attribuait au manganèse et, en France, Guyton de Morveau, puis Saussure, se rangeaient à son avis après des expériences pourtant peu concluantes. D'autres devaient plus tard l'imputer à l'oxyde de fer ou à la magnésie; plus clairvoyant, Collet-Descotils devait en apercevoir la cause dans la silice et l'alumine de l'argile; mais c'est à Vicat qu'allait bientôt revenir la gloire de mettre pleinement en lumière la vraie théorie de l'hydraulicité.

La fin du XVIII[e] siècle fut signalée par un fait important dans l'histoire des composés hydrauliques, la fabrication par Parker, en Angleterre, d'un produit qu'il appela *ciment romain* et pour lequel il prit une patente en 1796. Le procédé consistait à cuire certaines concrétions marneuses contenant de 30 à 35 pour 100 d'argile, mais en rejetant tous les morceaux ayant dépassé la température ordinaire de cuisson de la chaux.

La période révolutionnaire, pendant laquelle l'industrie française, réduite à ses propres ressources, prit un essor si caractéristique, vit se multiplier en France des recherches tendant à substituer des produits artificiels aux pouzzolanes naturelles qu'on avait, jusqu'alors, fait venir à grands frais d'Italie.

Tandis qu'en Angleterre Smeaton avait renouvelé des Romains l'usage de ces pouzzolanes et qu'en Hollande on les remplaçait, non sans succès, par une matière, connue sous le nom de terrace ou trass, extraite sur les bords du Rhin à Bonn et à Andernach et broyée ensuite à Dordrecht,

on mélangeait depuis longtemps à la chaux, dans le midi de la France, de la brique pilée ou du tuileau. A ces matières, qu'on appelait *ciment*, on substituait parfois des cendres de houille ou les résidus terreux de la fabrication des eaux-fortes.

Sur divers points du territoire français, de nombreux ingénieurs et savants se mirent en quête de pouzzolanes naturelles et surtout s'efforcèrent, à la suite du Suédois Baggé de Gothembourg, qui, au milieu du XVIIIe siècle, avait obtenu de bons résultats par la cuisson des schistes durs et ardoisés de Wennersbourg, de suppléer à l'action du feu central sur les roches par la chaleur plus docile des fours industriels. Sans entrer dans le détail de leurs tentatives, nous nous bornerons à citer les noms de Desmarets, Fanjas de Saint-Fond, Guyton de Morveau, de Cessart, Chaptal, Daudin, Dillon, Vauvilliers, Vitalis, Lemasson, Gratien-Lepère, etc.

Mais c'est encore à Vicat qu'il appartenait de couronner leur œuvre par ses longues et minutieuses études sur les pouzzolanes artificielles.

Ajoutons toutefois que tant d'efforts devaient rester à peu près stériles par suite de l'invention des ciments, et que, si l'usage des pouzzolanes naturelles s'est perpétué, quoique fort atténué, jusqu'à nos jours[1], aucune pouzzolane artificielle n'a été, à notre connaissance, l'objet d'une fabrication suivie.

La première apparition du ciment en France remonte à l'an X, ainsi qu'il appert d'un rapport rédigé par le citoyen Lesage au nom d'une Commission chargée d'examiner les propriétés d'un composé dénommé « plâtre-ciment » qu'on obtenait à Boulogne-sur-Mer par la calcination de certains galets trouvés sur la plage. En somme, ce produit n'était autre chose que le ciment romain découvert par Parker depuis quelques années de l'autre côté du détroit. Il est curieux de constater qu'on a continué à le fabriquer bien

[1] On emploie encore le trass dans quelques ports de la mer du Nord et la pouzzolane d'Italie dans la Méditerranée.

longtemps après l'invention du portland, et qu'une usine travaillant d'après ce principe existait encore à Boulogne il y a quelques années.

3. Vicat. — C'est en 1812 que l'illustre ingénieur français Vicat, du corps des Ponts et Chaussées, commença la série de recherches sur les composés hydrauliques, que sa mort seule, survenue le 10 avril 1861, devait interrompre. La rigueur de ses méthodes, la netteté de ses observations, l'extension considérable qu'il a fait prendre au sujet d'études qu'il avait abordé, l'importance capitale de ses découvertes, l'ont fait considérer à juste titre comme le véritable créateur de l'industrie des chaux hydrauliques et des ciments.

Après avoir énoncé, dès 1817, une longue série de conclusions, il publie, en 1818, le détail de ses premières recherches [1], et les résultats obtenus provoquent dans le monde savant une telle impression qu'une Commission est nommée pour contrôler ses expériences. Il prouve notamment que la propriété qu'ont certaines chaux de durcir sous l'eau ne dépend que de la présence d'argile dans les pierres calcaires ayant servi à les préparer, et il en conclut qu'il suffit, pour obtenir des *chaux hydrauliques*, comme il appelle dès lors ces produits, de calciner des mélanges convenables d'argile et de carbonate de chaux. Il montre en outre par l'expérience que, lorsqu'on force la dose d'argile jusqu'à 0,33 ou 0,40 pour 1 de chaux, la chaux que l'on obtient ne fuse point, mais donne, après pulvérisation et mouillage, une pâte qui prend corps sous l'eau très promptement. C'est la découverte du ciment artificiel. Enfin, le même mémoire traite des mortiers, des pouzzolanes naturelles et artificielles, des diverses causes qui peuvent influencer la qualité des maçonneries et, d'une manière générale, de toutes les questions se rattachant aux produits hydrauliques.

Sans abandonner ce vaste champ d'études, Vicat s'occupe, à partir de 1824, de chercher, en divers points de la France

[1] *Recherches expérimentales sur les chaux de construction, les bétons et les mortiers ordinaires.* Paris, 1818.

où d'importants travaux vont être entrepris, des carrières propres à fournir des chaux hydrauliques. Partout il en trouve et, poursuivant ses investigations sur tout le territoire, il arrive à dresser, après vingt ans de voyages, une liste de plus de neuf cents carrières dont il a analysé les matériaux, en indiquant la nature des composés qu'ils sont susceptibles de fournir par la cuisson [1]. Ce travail considérable a déterminé la création de nombreuses usines à chaux hydraulique.

En 1840, Vicat signale les dangers d'une classe de chaux, provenant de calcaires contenant de 20 à 23 pour 100 d'argile, et qu'il appelle les *chaux limites* [2]. Il ajoute toutefois, et il le confirme en 1851 [3], que ces calcaires peuvent, au contraire, donner des produits excellents, quand ils ont été portés à une température voisine de la vitrification. Ces conditions de fabrication sont précisément celles des ciments portland actuels, dont l'usage a pris aujourd'hui, comme on sait, un développement considérable.

Malgré les progrès réalisés dans la fabrication des chaux hydrauliques et des ciments, Vicat ne s'en tint pas à ses premières études sur les pouzzolanes artificielles. Des dégradations survenues à des mortiers de pouzzolane immergés en eau de mer lui donnèrent l'occasion de les reprendre. En 1846, il publie un mémoire [4] dans lequel il s'efforce de déterminer la meilleure cuisson qu'il convient de donner aux argiles pour en faire des pouzzolanes propres à résister à l'action de l'eau salée. En même temps, il aborde la grave question de la décomposition des mortiers immergés en eau de mer, qui devait, dès lors, être sa préoccupation constante pendant tout le restant de sa carrière, et il ne tarde pas à s'apercevoir que la principale sinon l'unique cause de cette

[1] *Recherches statistiques sur les substances calcaires à chaux hydrauliques et à ciments naturels*. Paris, 1853.

[2] *Recherches chimiques et pratiques sur les substances calcaires argilifères imparfaitement cuites*. Paris, 1840.

[3] *Recherches chimiques et pratiques sur les ciments éventés et brûlés* (*Annales des Ponts et Chaussées*. 1851, I. 236).

[4] *Nouvelles études sur les pouzzolanes artificielles comparées à la pouzzolane d'Italie, dans leur emploi en eau douce et en eau de mer*. Paris, 1846.

décomposition réside dans l'action du sulfate de magnésie qui, au contact de la chaux des mortiers, abandonne sa magnésie pour se transformer en sulfate de chaux.

Ses études sur cette question se trouvent développées dans un ouvrage terminé en 1854 et publié en 1857, qui a été couronné par la Société d'Encouragement pour l'Industrie nationale [1]. Les principales conclusions sont que, sauf quand elle est carbonatée, la chaux existe dans les mortiers à l'état de combinaisons très instables, qui finiraient toujours par se détruire nécessairement dans l'eau de mer ou même dans l'eau douce, si aucun obstacle ne s'opposait à la pénétration et au renouvellement de ces eaux. Au contraire, l'affinité de l'acide carbonique pour la chaux est très énergique, et le carbonate de chaux formé protège la masse du mortier contre les infiltrations pernicieuses.

En dehors des mémoires fondamentaux auxquels il vient d'être fait allusion et de quelques autres qui ne sont guère que des amplifications des premiers, Vicat a publié de nombreux articles de moindre envergure, ayant pour but, la plupart du temps, de réfuter des allégations d'autres auteurs qu'il jugeait erronées ou de démontrer la fausseté d'attaques dirigées contre ses propres travaux. Pendant quarante ans, rien n'a pu être publié sur les matières à l'étude desquelles il s'était adonné, qui ne passât à son crible, et, dans ses multiples controverses, il est rare que le dernier mot ne lui soit pas resté.

Aujourd'hui encore, on ne peut guère aborder l'étude de tel ou tel point particulier de la question si vaste des composés hydrauliques, qu'on ne s'aperçoive tôt ou tard que Vicat l'avait déjà depuis longtemps traité et souvent même élucidé.

4. Développement industriel en Angleterre. — Pendant qu'en France Vicat poursuivait méthodiquement la série de ses recherches, en Angleterre la fabrication du

[1] *Recherches sur les causes chimiques de la destruction des composés hydrauliques par l'eau de mer et sur les moyens d'apprécier leur résistance à cette action.* Paris, 1857 (2e édition revue et complétée en 1858).



ciment, basée presque exclusivement sur l'empirisme, prenait peu à peu un caractère industriel.

La renommée acquise rapidement par les ciments de Parker lui attirait des imitateurs : Dobbs en 1810, Saint-Léger en 1818, J. Aspdin en 1824, prenaient des patentes pour la fabrication de composés obtenus par la calcination de mélanges de terres argileuses avec de la chaux en poudre ou des calcaires. Le dernier notamment donnait à son produit le nom de *ciment de Portland* par suite de l'analogie que les enduits obtenus présentaient avec la pierre de Portland, fort appréciée dans les constructions. Toutefois, ce ciment n'avait rien de commun avec celui auquel on donne maintenant ce nom. C'était une sorte de chaux hydraulique obtenue à une température juste suffisante pour chasser l'acide carbonique du calcaire, avec des mélanges mal définis et s'écartant certainement de la composition actuelle.

En 1825, Frost fondait la première usine de la Tamise et cherchait à appliquer les principes de Vicat à la fabrication d'un ciment artificiel.

Peu de temps après, Pasley entreprenait de son côté une longue série de recherches dans le même but.

D'après cet auteur, il y avait en Angleterre, en 1838, lors de sa première publication, deux espèces de ciments naturels, dérivant l'un du ciment de Parker, l'autre de celui de Frost, présentant les uns et les autres les caractères des ciments rapides actuels et dénommés ciments romains. En 1847, le même auteur comptait trois usines à ciment artificiel d'une certaine importance. Il semble toutefois avoir oublié celle qu'avaient créée les descendants d'Aspdin.

Chaque fabricant s'appliquant à garder autant que possible le secret de ses procédés, il est difficile de fixer l'époque à laquelle le ciment portland est devenu ce qu'il est actuellement. Il est probable que la transformation a été progressive et qu'elle s'est opérée parallèlement sur la composition des mélanges et sur le degré de cuisson qu'on leur faisait subir. Quoi qu'il en soit, il est avéré que c'est en Angleterre que la fabrication du ciment portland s'est le plus rapidement développée.

Parmi les ingénieurs dont les travaux ont le plus contribué aux progrès de cette industrie dans ce pays, il convient de citer particulièrement le nom de Grant, qui a soumis les ciments à de nombreuses expériences en appliquant tout un système d'essais dont dérivent un grand nombre des méthodes employées actuellement pour les épreuves de réception. Ses essais ont montré notamment la supériorité des résistances des mortiers de ciment portland sur ceux de ciment romain.

5. Développement industriel en France. — En France, c'est d'abord l'industrie des chaux hydrauliques qui s'est le plus développée. M. Giraut, architecte à Nemours, est le premier qui ait fabriqué une chaux hydraulique par le mélange de chaux et d'argile d'après l'indication de Vicat. Mais M. de Saint-Léger a considérablement perfectionné et simplifié le procédé en créant, en 1826, aux Moulineaux, près de Paris, une usine à chaux artificielle, la seule qui fabrique encore aujourd'hui ce composé.

Quant aux chaux hydrauliques naturelles, les recherches statistiques de Vicat donnèrent un grand essor à leur fabrication. Nous nous bornerons à citer la fondation, en 1830, de l'usine du Teil, dont les produits ne tardèrent pas à acquérir une réputation universelle.

Ce n'est guère que vers 1830 qu'on commença à fabriquer industriellement du ciment, notamment dans la région de Vassy, qui est devenue un centre de production des ciments naturels à prise rapide.

En 1842, le colonel Breton découvrit, près de Grenoble, un gisement de calcaire à ciment remarquable par son homogénéité. Ce fut l'origine des ciments dits de la Porte de France, dont l'usage s'est répandu depuis dans tout le bassin de la Méditerranée. On se contenta tout d'abord de fabriquer, par la cuisson du calcaire brut, un produit naturel à prise rapide; puis l'usine greffa sur cette fabrication celle de divers produits un peu différents, surtout en ce qui concerne leur durée de prise.

Ultérieurement, l'industrie du ciment a pris, dans le Dau-

phiné, un grand développement par suite de la création d'un certain nombre d'autres usines [1]. Comme la première, la plupart produisent principalement des ciments naturels à prise plus ou moins rapide. L'une d'elles pourtant, fondée en 1857 par le fils de Vicat, opère tout autrement et fabrique un ciment portland artificiel par la cuisson à haute température d'un mélange intime et rigoureusement dosé de chaux grasse éteinte et blutée et d'un ciment prompt naturel.

En 1845, Dupont, reprenant le procédé décrit au commencement du siècle par Lesage, installa à Boulogne-sur-Mer une usine dans laquelle il prépara un ciment naturel par la calcination des galets de la plage. Bientôt se joignit à lui Demarle, qui, par ses recherches incessantes, fit faire de rapides progrès à la fabrication.

Après avoir substitué aux galets des calcaires argileux du voisinage, ce dernier fut amené, à la suite de nombreuses analyses des ciments anglais, qui étaient alors très appréciés, à cuire des mélanges artificiels de marnes plus ou moins riches en argile. Pour assurer à ses mélanges une composition régulière, il imagina les bassins doseurs, dans lesquels les matières, délayées dans l'eau d'après le système anglais, furent recueillies, analysées et corrigées quand leur composition s'écartait du dosage adopté.

En 1855, les principes de la nouvelle fabrication étaient posés, mais ce n'est qu'en 1859 qu'elle devint réellement industrielle. Grâce aux soins de toute nature qui y furent apportés, la qualité s'améliora rapidement, et la raison sociale, devenue Demarle et Lonquéty, ne tarda pas à partager la faveur des ingénieurs avec les meilleures marques anglaises.

Aux environs de l'usine de Boulogne, devenue l'une des plus importantes qui existent, se sont installées ultérieurement beaucoup d'autres usines travaillant d'après les mêmes principes et, pour la plupart, avec les mêmes soins. Leur admission depuis 1885 aux adjudications de l'État a exclu définitivement du marché français les marques anglaises, qui

[1] Voir Gobin, *Étude sur la fabrication et les propriétés des ciments de l'Isère* (*Ann. des Ponts et Chaussées*, juin 1889).

y primaient il y a quinze ans encore. Actuellement, la région de Boulogne est le centre le plus important de la fabrication française des ciments portland artificiels.

En dehors des régions de Vassy, de Grenoble et de Boulogne, se sont établies, surtout depuis quelques années, sur divers points du territoire français, des usines dont les procédés de fabrication s'écartent plus ou moins de ceux qui viennent d'être signalés sommairement.

Toutefois, les nombreuses modifications apportées aux modes de préparation et de cuisson des matières, conséquences nécessaires du degré de développement où est parvenue l'industrie des ciments, ne touchent en rien le principe même ni la nature de ces produits.

Il serait injuste de ne pas mentionner les nombreux travaux scientifiques qui, en France, ont accompagné ou même parfois provoqué les progrès de l'industrie des composés hydrauliques. Plusieurs sont dus à des fabricants, d'autres à des savants de carrière; mais on constate que le plus grand nombre émanent d'ingénieurs appelés par leurs fonctions à employer ces produits, ainsi qu'en témoignent les fréquents articles parus depuis Vicat dans les *Annales des Mines* et surtout dans celles *des Ponts et Chaussées*.

Parmi les travaux dont l'influence s'est le plus fait sentir, une place spéciale revient au *Cahier des Charges des fournitures de ciment pour les ports de Boulogne et de Calais* élaboré, en 1885, par MM. Guillain et Vétillart. Outre qu'il a fixé un système d'épreuves dont l'adoption progressive par la plupart des Services publics a fait faire un grand pas à l'unification des méthodes d'essai, ce règlement a provoqué l'institution d'un contrôle officiel de la fabrication dans les usines admises aux adjudications de l'État, contrôle qui a eu pour résultat, au moins pour celles du Boulonnais, de les renseigner sur leur propre fonctionnement en prévenant leurs défaillances, et de mettre leurs produits en valeur au détriment de leurs concurrents étrangers.

Aussi, tandis qu'en Angleterre, où elle avait pris naissance, l'industrie du ciment, abandonnée à ses propres res-

sources et vivant sur son ancienne renommée, paraît être restée à peu près stationnaire, en France elle a suivi le progrès et n'a cessé de se perfectionner.

6. Développement industriel en Allemagne et dans les autres pays. — Mais c'est surtout en Allemagne que la fabrication du portland a pris, en l'espace de quelques années, une extension considérable.

Bien que la fondation de la première usine, à Stettin, remonte à 1855, l'augmentation de la production s'est principalement accusée à partir de 1877, date de la création de l'Association des Fabricants de ciment allemands.

Elle est due, en partie, aux efforts constants de ce puissant syndicat qui, après avoir fait adopter officiellement, en 1878, par le gouvernement prussien, un système de règles normales pour la livraison et l'essai des ciments, n'a, depuis sa fondation, négligé aucun des moyens propres à donner le plus grand essor à son industrie. Elle tient aussi sans doute à des questions de tarifs de chemins de fer, de fret et de droits de douane. Mais une de ses principales causes réside certainement dans l'initiative individuelle des fabricants et les patientes recherches auxquelles se sont livrés dans ce pays nombre de techniciens, travaillant la plupart pour le compte de ces derniers.

Au point de vue purement historique, la fabrication du ciment dans les autres pays ne présente qu'un intérêt secondaire. Nous n'en dirons rien ici, si ce n'est qu'elle s'y développe de jour en jour en mettant à profit les derniers progrès, et que, grâce à l'abondance à la surface du globe des matières premières propres à la fabrication des produits hydrauliques, bien des pays, jadis tributaires de leurs voisins, voient se fonder chez eux des usines où ils pourront s'alimenter à meilleur compte.

7. Autres variétés de ciments. — Dans le rapide exposé qui vient d'être fait de l'évolution des composés hydrauliques, il a été question successivement des mélanges de

chaux grasse et de pouzzolane, des chaux hydrauliques, des ciments naturels et des ciments artificiels. A côté de ces composés, que nous pourrions appeler fondamentaux, s'en sont créés d'autres dont la production a été, jusqu'à présent, assez restreinte, et parmi lesquels nous citerons particulièrement les ciments magnésiens, les ciments de grappiers et les ciments de laitier.

Le principe des *ciments magnésiens*, imaginé par Vicat, était de remplacer la chaux par la magnésie dans les ciments ordinaires, en vue d'obvier aux décompositions résultant, dans les mortiers immergés en mer, de la substitution de la magnésie de l'eau salée à la chaux du ciment. Toutefois, vu le prix de revient relativement élevé de ces ciments, leur usage ne s'est pas développé. La magnésie caustique s'éteint d'ailleurs beaucoup plus lentement que la chaux, ce qui peut être une cause de dangers, ainsi qu'on l'a constaté pour des ciments résultant de la cuisson de calcaires assez fortement dolomitiques.

Lorsqu'on cuit industriellement un calcaire plus ou moins argileux, il est impossible que toute la masse subisse également l'action du feu. La cuisson varie généralement suivant la région du four, parfois même suivant le point d'un même morceau qu'on considère.

Il en résulte que, même si la matière première est parfaitement homogène quant à sa composition chimique, le degré de combinaison de la chaux avec les éléments de l'argile varie suivant la température atteinte en chaque point, de sorte qu'on recueille finalement un mélange de produits pouvant jouir de propriétés très différentes, quoique composés chimiquement des mêmes corps simples en mêmes proportions. *A fortiori* doit-il en être ainsi quand le calcaire soumis à la cuisson n'est pas très homogène, comme cela peut avoir lieu quand on l'enfourne tel qu'il sort de la carrière. En général, à mesure que la cuisson devient plus énergique, les morceaux obtenus sont d'une couleur plus foncée en même temps que plus durs et plus lents à s'éteindre sous l'action de l'humidité.

Dans la fabrication de la chaux hydraulique éteinte en poudre, les grains non éteints ont reçu le nom de grappiers. On peut les séparer par tamisage et les broyer à part après une nouvelle extinction plus prolongée ; on obtient alors un produit dont les propriétés se rapprochent de celles du ciment, et qu'on appelle *ciment de grappiers*. L'usine du Teil notamment fabrique ainsi, depuis 1869, un ciment qui jouit d'une bonne réputation.

Quoiqu'une patente ait été prise dès 1866 pour la fabrication d'un *ciment de laitier*, ce n'est guère que depuis une dizaine d'années qu'on fabrique industriellement ce produit. Le principe en est le même que celui des mortiers de chaux et pouzzolane, avec cette particularité qu'on emploie comme matière pouzzolanique certains laitiers de haut-fourneau ayant subi un traitement spécial et amenés à une grande finesse, et que le mélange avec la chaux est fait d'avance et mécaniquement, de manière à présenter une homogénéité parfaite.

L'industrie du ciment de laitier a pris un développement rapide à cause du prix relativement bas de ce produit et de ses qualités rappelant celles du portland, au point qu'il fait une concurrence de plus en plus sérieuse à ce dernier ainsi qu'aux chaux hydrauliques.

§ 2. — État actuel de la fabrication des produits hydrauliques

8. Fabrication française. — Nous empruntons à une publication récente de M. Candlot [1] les éléments des trois tableaux ci-dessous, qui résument l'état actuel de l'industrie des principaux produits hydrauliques en France et les importations et exportations françaises pendant les dernières années écoulées.

[1] Candlot, *L'Industrie des Chaux hydrauliques et des Ciments en France* (*Revue générale des Sciences* du 15 avril 1895).

FABRICATION FRANÇAISE EN 1895

DÉSIGNATION DES PRINCIPALES USINES	DÉPARTEMENT	PRODUCTION ANNUELLE approximative
1° CHAUX HYDRAULIQUES NATURELLES		tonnes
Pavin de Lafarge au Teil	Ardèche	300 000
Valette Viallard à Cruas	*id.*	20 à 25 000
Contes-les-Pins près Nice	Alpes-Maritimes	25 000
Marseille	Bouches-du-Rhône	»
Sauveterre-la-Lémance	Lot-et-Garonne	20 000
Libos	*id.*	»
Castel-Franc	*id.*	»
Laborie	Dordogne	6 000
Société Générale des chaux de Saint-Astier.	*id.*	7 500
La Massoulie et Puyonem	*id.*	7 à 8 000
Saint-Astier (M. Malleboy)	*id.*	4 à 5 000
Saint-Astier (M. Eymery)	*id.*	10 000
Marans (4 usines)	Vendée	»
Echoisy	Charente	1 000
Paviers	Indre-et-Loire	20 000
Trogues	*id.*	»
Société des Chaux de Beffes	Cher	30 à 40 000
Beffes (MM. Polliet, Baillot et Villevieille).	*id.*	»
Beffes (M. Langlois)	*id.*	»
Senonches	Eure-et-Loir	»
Laigle	Orne	»
Louvières près Vitry-le-François	Marne	26 000
Vitry-le-François (Pavin de Lafarge)	*id.*	»
Société des Chaux de l'Aube — Le Seilley à Ville-sous-la-Ferté.	Aube	10 000
Société des Chaux de l'Aube — Saint-Bernard à Clairvaux	*id.*	10 000
Société des Chaux de l'Aube — La Gravière à Mussy-sur-Seine.	*id.*	8 000
Société des Chaux de l'Aube — Côtes d'Alun	Haute-Marne	3 000
Société des Chaux de l'Aube — Ancy-le-Franc	Yonne	5 000
Xeuilley	Meurthe-et-Moselle	15 000
Virieu-le-Grand	Ain	25 à 28 000
Béon (Culoz)	*id.*	»
Bons	*id.*	»
Buséal	*id.*	»
Montalieu et Bouvesse	Isère	30 000
2° CHAUX HYDRAULIQUE ARTIFICIELLE		
Les Moulineaux	Seine	15 à 20 000
3° CIMENTS NATURELS		
M. Dumarcet à Provency	Yonne	14 à 15 000
MM. Millot à Marsy et à Sainte-Colombe.	*id.*	14 à 15 000
Joudrier et Cie — Région de Vassy	*id.*	8 à 10 000
M. Prévost — Région de Vassy	*id.*	8 à 10 000
M. Bougault — Région de Vassy	*id.*	8 à 10 000
M. Landry à Vénarey-les-Laumes	Côte-d'Or	8 à 10 000
M. Journault à Marigny-le-Cahouet	*id.*	6 à 8 000
M. Tripier à Vénarey et environs	*id.*	10 à 15 000
M. Détang à Pouilly	*id.*	6 000
Ciment de Roquefort à la Bedoule	Bouches-du-Rhône	»
Ciment de la Valentine	*id.*	30 000
Romain Boyer et Cie à la Bedoule	*id.*	40 000
MM. Rastoin frères à la Bedoule	*id.*	20 000

DÉSIGNATION DES PRINCIPALES USINES	DÉPARTEMENT	PRODUCTION ANNUELLE approximative
		tonnes
Société générale et unique des Ciments de la Porte de France à Grenoble........	Isère	
Thorrand et Cie à Voreppe....	*id.*	
Vicat et Cie à Saint-Laurent-du-Pont..	*id.*	
Vicat et Cie à Uriage...............	*id.*	
Guingat et Cie à Grenoble et aux environs	*id.*	180 000
M. Berthelot à Vif......................	*id.*	
Pelloux et Cie à Valbonnais.............	*id.*	
Société Générale du Portland-Laitier à Saint-Ismier.........................	*id.*	
Cahors, Castel-Franc, Libos............	Lot-et-Garonne et Lot	8 000
Allas de Berbiguières.	Dordogne	14 000
Sauveterre-la-Lémance..................	Lot-et-Garonne	5 000
4° Ciments portland artificiels		
Demarle et Lonquéty à Boulogne et Desvres............................	Pas-de-Calais	130 000
Darsy Lefebvre et Lavocat à Neufchâtel .	*id*	25 000
Sollier et Cie à Neufchâtel..............	*id.*	30 000
M. Basquin à Neufchâtel.................	*id.*	10 à 15 000
Portland-Couronne à Dannes............	*id.*	20 000
Delbende et Cie à Desvres..............	*id.*	20 000
Cie Nouvelle des Ciments Portland du Boulonnais à Desvres..................	*id.*	40 à 50 000
Samer	*id.*	»
Lumbres...............................	*id.*	»
Lottinghem	*id.*	»
Camiers................................	*id.*	»
E. Cambier et Cie à Pont-à-Vendin.......	*id.*	15 000
Pernes en Artois	*id.*	5 à 6 000
Vicat et Cie à Vif près Grenoble.........	Isère	20 000
Vicat et Armand près de Marseille	Bouches-du-Rhône	15 à 20 000 [1]
M. Romain-Boyer à Marseille.....	*id.*	»
MM. Quillot frères à Frangey............	Yonne	20 à 25 000
M. Chantemille à Montot	*id.*	»
Cie Parisienne près Mantes..............	Seine-et-Oise	15 000
5° Ciments de laitier		
M. Henry à Saint-Dizier................	Haute-Marne	10 à 15 000
M. Raty à Saulnes......................	Meurthe-et-Moselle	10 à 15 000
Neuves-Maisons.........................	*id.*	»
Pavin de Lafarge à Vitry-le-François....	Marne	10 à 15 000
M. Henry à Bourges	Cher	»
Société Générale du Portland-Laitier à Saint-Ismier.........................	Isère	»
Société Générale du Portland-Laitier à Laudun...........	Gard	»
Société Générale du Portland-Laitier au Boucau..............................	Pyrénées-Orientales	» [2]

1 En construction.
2 Usine incendiée récemment.

IMPORTATIONS ET EXPORTATIONS FRANÇAISES AVEC INDICATION DES PORTS D'ENTRÉE ET DE SORTIE

POINTS D'ENTRÉE OU DE SORTIE	1893				1894			
	CHAUX		CIMENTS		CHAUX		CIMENTS	
	IMPORTATIONS	EXPORTATIONS	IMPORTATIONS	EXPORTATIONS	IMPORTATIONS	EXPORTATIONS	IMPORTATIONS	EXPORTATIONS
	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes
Hazebrouck à Charleville	183 649	1 508	10 546	1 472	188 429	1 365	10 320	6 672
Longwy à Pontarlier...	54 522	8 353	383	6 906	59 071	9 318	295	7 569
Bellegarde à Modane...	80	35 452	18	22 090	100	41 351	16	27 210
Nice, Marseille, Cette, Perpignan............	27	107 532	203	100 571	73	115 708	133	116 278
Bayonne à Saint-Nazaire	28	1 654	1 256	3 987	»	3 085	1 393	4 144
Brest à Dunkerque.....	413	460	5 804	39 822	442	445	2 077	23 248
TOTAUX..........	238 719	154 959	18 210	174 848	248 115	171 272	14 234	185 121

IMPORTATIONS ET EXPORTATIONS FRANÇAISES AVEC INDICATION DES PAYS

PAYS DE PROVENANCE (importations) OU D'ENTRÉE (exportations)	CHAUX	CIMENTS			
	1891	1891	1892	1893	1894
	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes
IMPORTATIONS					
Allemagne..............	25 673	»	»	»	»
Angleterre..............	»	7 845	3 472	3 492	»
Belgique................	191 940	14 072	12 658	10 548	»
Espagne................	»	1 535	895	768	»
Suisse..................	3 132	»	»	281	»
Pays du tableau, dont les chiffres ne sont pas donnés, et autres pays.	106	2 555	1 144	1 712	»
TOTAUX..........	220 851	26 007	18 161	16 801	14 235
EXPORTATIONS					
Algérie.................	41 118	23 036	16 835	18 215	»
Allemagne..............	8 569	6 139	4 675	5 577	»
Belgique................	1 763	»	»	»	»
Brésil..................	»	12 471	6 709	5 765	»
Egypte..................	7 086	»	5 120	6 077	»
Espagne................	19 473	28 049	32 918	34 086	»
Grèce..................	14 957	»	»	»	»
Indo-Chine.............	»	»	5 560	8 523	»
Italie..................	»	22 943	18 166	18 527	»
Mexique................	2 436	»	»	»	»
Portugal...............	4 233	9 586	4 281	6 267	»
Roumanie...............	»	»	4 552	4 369	»
Russie..................	»	5 487	4 530	6 565	»
Suisse..................	34 427	17 910	11 452	13 822	»
Tunisie.................	6 007	5 893	6 333	6 949	»
Turquie................	6 728	11 488	16 242	17 238	»
Pays du tableau, dont les chiffres ne sont pas donnés, et autres pays.	7 910	38 411	15 542	22 868	»
TOTAUX.........	154 707	181 413	152 915	174 848	185 128

9. Fabrication étrangère. — Il est difficile de se procurer des indications exactes sur la production des usines étrangères. Nous avons trouvé dans diverses publications quelques renseignements que nous reproduisons dans les tableaux ci-dessous, avec le regret de ne pouvoir en donner de plus récents ni de plus complets.

ALLEMAGNE (1894) [1]

LOCALITÉ	RAISON SOCIALE	PRODUCTION ANNUELLE en tonnes
Hambourg	Alsen'sche Portland Cement Fabriken	126 000
Lehrte	« Germania » H. Manske et C°	117 000
Amöneburg (près Biebrich)	Dyckerhoff und Söhne, Portland Cement Fabrik	108 000
Heidelberg	P. C. Werk Heidelberg	90 000
Mannheim	Mannheimer P. C. F	81 000
Hemmoor a. d. Oste	P. C. F. Hemmoor	81 000
Stettin	Pommerscher Industrie Verein auf Aktien	72 000
Groschowitz	Schlesische Aktien Gesellschaft für P. C. Fabrikation	63 000
Stuttgart	Stuttgarter C. F. Blaubeuren	63 000
Berlin	« Rudersdorf »	54 000
Oppeln	Oberschlesische P. C. F	54 000
Oppeln	Oppelner P. C. Fabriken	54 000
Cammin (Poméranie)	Stettin Gristower P. C. F. E. Kanter et C°	45 000
Hanovre	Hannoversche P. C. F. Actiengesellschaft	45 000
Lüneburg	P. C. F	45 000
Obercassel	Bonner Bergwerks-und Hüttenverein C. F	45 000
Stettin	P. C. F. « Stern »	45 000
Stettin	Stettiner P. C. F	45 000
Hambourg	Breitenburger P. C. F	36 000
Karlstadt	P. C. F	36 000
Beckum	Aktien Gesellschaft « Westfalia »	27 000
Blaubeuren	P. C. F. Blaubeuren Gebr. Spohn	27 000
Glothe	« Saxonia »	27 000
Göschwitz	Sächsisch-Thüringische P. C. F. Prüssing und C°	27 000
Halle a. S	P. C. F. Halle a. S	27 000
Hambourg	Lägerdorfer P. C. F. von E. Lion und C°	27 000
Höxter	Aktien Gesellschaft Hoxter'sche P. C. F	27 000
Höxter	P. C. W. Höxter-Godelheim A. G	27 000
Lauffen am Neckar	Württembergisches P. C. W	27 000
Malstatt	C. H. Böcking und Dietsch P. C. F	27 000
Offenbach a. M	Offenbacher P. C. F. Aktien Gesellschaft	27 000
Oppeln	P. C. F	27 000
Porta	Bremer P. C. F. « Porta »	27 000
Recklinghausen	Wicking'sche P. C. und Wasserkalkwerke	27 000
Stettin	Stettin Bredower P. C. F	27 000
Zossen	« Adler » Deutsche P. C. F	27 000
	plus 12 usines inscrites pour 18 000 tonnes	216 000
	et 11 usines inscrites pour 9 000 tonnes	99 000
	TOTAL	2 052 000

[1] D'après le Procès-Verbal des séances, des 26 et 27 février 1895, de l'Association des Fabricants de ciment portland allemands.

Ce tableau ne mentionne pas les usines, d'ailleurs peu nombreuses, qui ne font pas partie de l'Association des Fabricants de ciment portland allemands. Les chiffres de production qu'il indique, basés sur les déclarations des fabricants intéressés, ont été arrondis, sans doute par excès, en multiples exacts de 9.000 tonnes, soit 50.000 barils d'un poids *brut* de 180 kilogrammes. La production réelle doit donc être inférieure aux évaluations données.

ANGLETERRE (vers 1884) [1]

MARQUE	PRODUCTION ANNUELLE en tonnes
White Brothers	100 000
Knight, Bevan and Sturge	80 000
Lee Son and Smith	80 000
Burham	80 000
Robins	80 000
Johnson	60 000
London Portland Cement C°	45 000
Wouldham	25 000
Harwich	25 000
Formby	25 000
Walsend	?
LA PRODUCTION ANNUELLE TOTALE ANGLAISE PEUT AINSI SE RÉPARTIR :	
Sur la Medway, la Swale et leurs affluents	400 000
Sur la Tamise	400 000
Sur la Tyne et pour le reste de l'Angleterre	700 000
TOTAL	1 500 000

Il existe en 1896, en Angleterre, environ 200 usines dont la plupart sont petites et fabriquent du ciment naturel. La production totale actuelle est évaluée à 1.500.000 à 2.000.000 de tonnes et tendrait plutot à diminuer.

AUTRICHE-HONGRIE (1894) [2]

Les usines autrichiennes faisant partie de l'Association des Fabricants de ciment portland allemands sont situées à Szczakowa, Budapesth, Salzbourg, Linz, Prague (deux usines),

[1] D'après le capitaine PETITBON, *Revue du Génie militaire*, janv.-fév. 1888.
[2] D'après le Procès-Verbal des séances, des 26 et 27 février 1895, de l'Association des Fabricants de ciment portland allemands.

Judendorf, Labatlan, Lédecz, Mariaschein et en Styrie. Leur production totale, évaluée de la même manière que celle des usines allemandes, atteint 17.000 tonnes.

Nous n'avons pas pu avoir de renseignements sur les autres.

BELGIQUE (1890) [1]

Usines à ciment portland artificiel

LOCALITÉ	RAISON SOCIALE	PRODUCTION ANNUELLE en tonnes
Niel on Ruppel..	Société Anonyme........................	72 000
Cronfestu........	Dufossez et Henry......................	20 000
Cronfestu........	Locose et Lévie........................	30 000
Beerssc..........	Schmole et Cie.........................	20 000
	TOTAL..................	142 000

On fabrique en outre, en Belgique, beaucoup de chaux hydrauliques et de ciments naturels, notamment dans la région de Tournai.

ÉTATS SCANDINAVES

ÉTAT	USINE	PRODUCTION ANNUELLE EN TONNES		
		1889 (?) [2]	1894 [3]	1896 [4]
Danemark.	Aalborg........	22 500	27 000	40 000
	« Dania ».................	18 000		17 000
	« Cimbria »	7 200	18 000	12 000
	Deux autres petites usines, ensemble...............	1 800		
Suède.....	Oeland...................	22 500	9 000	
	« Skanska » (Malmö).......	39 600	36 000	76 500
	Visby	9 000		
Norwège ..	Christiania...............	12 600		12 000
	TOTAL.......	133 200		157 500

[1] D'après CANDLOT, *Ciments et Chaux hydrauliques*, p. 74.

[2] D'après un article paru dans *Engineering*, 25 avril 1890.

[3] D'après le Procès-Verbal des séances des 26 et 27 février 1895, de l'Association des Fabricants de ciment portland allemands. Production évaluée en multiples exacts de 9.000 tonnes, comme pour les usines allemandes.

[4] Renseignements officieux donnés sous toute réserve. La production indiquée pour la Suède est le total de cinq usines.

ÉTATS-UNIS DE L'AMÉRIQUE DU NORD (1888)[1]

Ciments naturels

USINE	PRODUCTION ANNUELLE en tonnes
Rosendale, Ulster Co, N. Y.	307 000
Akron, N. Y.	97 000
Louisville, Ky	165 000
La Salle, Ill.	45 000
Mankato, Minn.	22 000
Milwaukee, Wis.	54 000
Lehigh Valley, Pa.	68 000
Potomac River.	13 500
Fort Scott, Kas.	5 500
Howes Cave, N. Y.	6 500
Eastern Ohio	11 000
Onondaga, N. Y.	34 000
Kansas City, Mo.	7 000
Cement, Ga.	2 500
Virginia, Texas, and New-Mexico	24 500
TOTAL	862 500

Il a été fabriqué en outre, en 1888, 45 000 tonnes de ciment portland.

Depuis la date de cette statistique, il s'est monté aux États-Unis de nouvelles usines à ciment portland artificiel.

ESPAGNE

Peu d'usines à ciment. Le ciment rapide de Zumaya jouit d'une certaine réputation.

ITALIE

Pas de ciment artificiel proprement dit. Usines principales à Cazale et à Bergame.

[1] D'après *Mineral Records of the United-States for* 1888.

RUSSIE (1890) [1]

USINE	PRODUCTION ANNUELLE en tonnes
Schmidt à Riga	25 000
Port-Kunda (Esthland)	25 000
Grodziec (Pologne)	25 000
Liphart, Tschurowo	5 000
Podolsk, société par actions de Moscou	8 000
Noworossisky, sur la mer Noire (Ciment naturel)	25 000
Gluchoosersky, usine de Saint-Pétersbourg	25 000
Wysoka (Pologne), Saint-Lazy	16 000
TOTAL	154 000

En 1896, la Russie possède 10 usines à ciment portland artificiel et 4 nouvelles en construction. On évalue la production à environ 350.000 tonnes.

SUISSE

Usines à Aarau, Zur Linden, Saint-Sulpice, Neufchâtel, Liestal, etc.

On fabrique surtout des ciments naturels.

Nous terminerons cette énumération en indiquant, d'après M. von Bük, les chiffres de l'exportation totale des ciments européens en 1890.

PAYS D'EXPORTATION	QUANTITÉS EXPORTÉES en tonnes
États-Unis de l'Amérique du Nord et Canada	432 000
Amérique du Sud	126 000
Australie	225 000
Asie	90 000
Afrique	27 000
TOTAL	900 000

[1] D'après CANDLOT, *Ciments et Chaux hydrauliques*, p. 71.

Ces exportations se décomposent de la manière suivante, d'après les pays d'origine :

PAYS D'ORIGINE	QUANTITÉS EXPORTÉES en tonnes
Angleterre	624 600
Allemagne	198 000
Belgique	54 000
France	12 600
Autres pays	10 800
TOTAL	900 000

Enfin, à titre d'exemple particulier, le tableau ci-après donne, par année et par pays d'origine, les exportations, traduites en tonnes métriques, de ciment portland aux États-Unis de l'Amérique du Nord.

ANNÉE	ANGLETERRE	ALLEMAGNE	BELGIQUE	FRANCE	AUTRES PAYS	TOTAL
1884	66 900	33 500	4 000	960	40	105 400
1885	48 600	48 200	6 300	260	640	104 000
1886	59 900	51 200	3 900	730	370	116 100
1887	112 000	76 700	4 100	870	630	194 300
1888	239 000	101 500	17 900	1 890	1 710	362 000
1889	170 000	87 100	14 600	700	600	273 000
1890	209 000	130 000	28 800	2 775	25	370 600
1891	239 800	166 000	96 800	550	850	504 000
1892	203 000	193 500	85 900	560	1 040	484 000

Puissent ces chiffres, fortement ascendants pour les trois premières provenances, stimuler l'industrie française, dont les produits ne le cèdent pourtant en rien comme qualité à ceux des autres pays.

CHAPITRE II

CLASSIFICATION

10. Anciennes classifications. — Ayant montré que le degré d'hydraulicité des chaux dépendait de la présence de plus ou moins d'argile dans les calcaires dont elles provenaient, Vicat se trouva tout naturellement conduit à les classer d'après la teneur des calcaires en argile. Mais sa méthode était assez compliquée en ce qu'elle exigeait un calcul pour reconstituer, après élimination des impuretés, la composition du calcaire pur correspondant à une chaux donnée.

Un mode de classification équivalent, mais plus simple, imaginé aussi par Vicat, repose sur la notion de l'indice d'hydraulicité, rapport de la proportion des éléments hydrauliques, silice et alumine, à celle de la chaux. Il a l'avantage de s'appliquer également aux calcaires et aux produits cuits, quel que soit d'ailleurs leur degré de pureté. Toutefois, l'illustre ingénieur a souvent varié dans ses appréciations sur les limites à adopter pour séparer les diverses catégories de produits.

M. L. Durand-Claye, après avoir compulsé les volumineuses recherches statistiques de Vicat et cherché à établir une concordance entre les désignations adoptées pour les produits et les teneurs en argile correspondantes, est arrivé à reconstituer, comme l'indique le tableau ci-après, ce qu'on pourrait appeler la classification moyenne de Vicat :

DÉSIGNATION DES PRODUITS	INDICES d'hydraulicité	TENEURS correspondantes en argile des calcaires supposés purs
Chaux grasse ou maigre [1]	de 0,00 à 0,10	de 0,0 à 5,3
— faiblement hydraulique	de 0,10 à 0,16	de 5,3 à 8,2
— moyennement hydraulique	de 0,16 à 0,31	de 8,2 à 14,8
— hydraulique proprement dite	de 0,31 à 0,42	de 14,8 à 19,1
— éminemment hydraulique	de 0,42 à 0,50	de 19,1 à 21,8
Chaux limite ou ciment à prise lente	de 0,50 à 0,65	de 21,8 à 26,7
Ciment à prise rapide	de 0,65 à 1,20	de 26,7 à 40,0
Ciment maigre	de 1,20 à 3,00	de 40,0 à 62,6
Pouzzolane	au-dessus de 3,00	au-dessus de 62,6

Cette classification, appliquée aux calcaires crus, permet jusqu'à un certain point de prévoir la nature des produits qu'ils pourront donner par une cuisson convenable. Par contre, elle ne suffit pas quand il s'agit de distinguer les produits cuits. La nature et les propriétés d'un pareil composé dépendent, en effet, non de sa teneur brute en silice et en alumine, mais de la proportion de ces éléments qui y existent à l'état de combinaison avec la chaux, proportion qui est d'autant plus grande que l'action du feu a été plus énergique.

Considérons, par exemple, un calcaire contenant 20 pour 100 d'argile.

Au début de la cuisson, l'acide carbonique du carbonate de chaux est chassé, en même temps que l'argile subit de son côté une modification mal définie qui, si elle était seule, aurait pour effet de la transformer en pouzzolane. Un morceau dont la cuisson est arrêtée à ce point ne tarde pas, quand on l'abandonne à l'air humide, à s'émietter comme de la chaux qui s'éteint, et il est probable qu'en réalité il est composé d'un mélange intime de chaux et de pouzzolane artificielle.

Pour une cuisson un peu plus forte, l'alumine entre en combinaison avec la chaux et, comme l'aluminate a la propriété de faire prise rapidement au contact de l'eau, on obtient un ciment à prise prompte.

[1] La chaux maigre ne diffère de la chaux grasse que par la présence d'impuretés non hydrauliques.

La cuisson augmentant encore, la silice de l'argile se combine à son tour avec une proportion croissante de chaux, et le morceau prend une couleur de plus en plus foncée, en même temps que sa densité augmente. La prise devient plus lente, sans doute par suite de la substitution de silico-aluminates aux aluminates initiaux et, à mesure que la proportion de chaux libre diminue, le morceau cuit devient de plus en plus réfractaire à la désagrégation spontanée résultant de l'extinction de cette chaux à l'air.

Quand la cuisson a atteint un degré tel que la matière ait subi un léger commencement de ramollissement, on obtient une roche noire, dense et dure, qui peut rester plusieurs années à l'air humide sans s'émietter et qui, broyée, donne précisément le ciment portland.

Enfin, une cuisson supérieure provoque une combinaison plus intime des éléments en présence et produit une matière scoriacée qui, broyée et mise en contact avec de l'eau, ne fait plus prise, ainsi que nous l'avons constaté dernièrement après avoir cuit au four électrique un morceau de pâte à ciment [1].

Pour des proportions d'argile autres que celles de l'exemple choisi, les choses se passent évidemment d'une manière analogue. Les températures correspondant aux principaux changements de propriétés doivent d'ailleurs varier suivant les proportions des éléments en présence et surtout suivant la teneur plus ou moins forte du calcaire en matières telles que l'oxyde de fer ou les alcalis, capables de jouer le rôle de fondants.

Une classification rationnelle ne peut donc être basée que sur les proportions réellement combinées de chacun des éléments, tels que la silice et l'alumine, qui peuvent donner avec la chaux des sels jouissant de la propriété de faire prise.

Elle doit, en outre, tenir compte dans une certaine mesure du mode de fabrication et, en tout cas, définir chaque

[1] Certaines précautions ont été nécessaires pour éviter la volatilisation d'une partie de la silice. L'analyse du produit cuit a d'ailleurs montré que sa composition n'avait pas varié.



catégorie de produits d'une manière suffisamment nette pour éviter toute fraude tendant à faire passer un produit inférieur comme appartenant à une classe mieux réputée.

Ce sont là évidemment des conditions très difficiles à réunir, car on ne possède actuellement aucun moyen de déterminer sûrement la nature des combinaisons qui se sont formées entre les éléments simples dont la chimie révèle la présence, et, d'autre part, on ne peut prévoir *a priori* toutes les adultérations possibles des produits fabriqués.

La question se complique d'ailleurs de considérations d'ordre commercial, par suite de l'opposition de certains fabricants dont l'intérêt est de laisser planer quelque ambiguïté sur les noms d'emprunt qu'ils donnent à leurs produits.

Aussi n'existe-t-il encore aucune classification bien rigoureuse.

11. Classification adoptée par l'auteur. — Faute de mieux, nous adopterons, dans le cours de cette étude, la classification suivante, qui nous paraît correspondre à peu près aux termes les plus généralement admis.

Nous partagerons d'abord tous les produits pouvant résulter de la cuisson des calcaires plus ou moins argileux en trois grandes classes comprenant respectivement les chaux, les ciments et les pouzzolanes.

A. Chaux. — Les chaux sont caractérisées par leur propriété de s'éteindre au contact de l'eau avec dégagement de chaleur et réduction de leur masse en poussière. Nous les définirons par ce fait que, soit qu'elles soient livrées en roches ou en poudre, on les pulvérise toujours par extinction au contact de l'eau.

Nous les diviserons en trois catégories correspondant sensiblement à celles de Vicat, savoir :

1° *Chaux grasses*. — Chaux provenant de calcaires contenant moins de 6 pour 100 de matières étrangères, argile ou autres éléments, et par suite contenant elles-mêmes, avant extinction, moins de 8 à 9 pour 100 et, après extinc-

tion en poudre, moins de 6 à 7 pour 100 de leur poids de ces matières.

2° *Chaux maigres.* — Chaux contenant plus de matières étrangères que les chaux grasses, et qui, gâchées en pâte ferme après parfaite extinction, mais sans éventation, puis immergées dans de l'eau douce tranquille et non aérée, n'ont pas encore fait prise au bout d'un mois.

3° *Chaux hydrauliques.* — Produits résultant de la cuisson de calcaires naturels ou artificiels plus ou moins siliceux et alumineux, puis de la pulvérisation de la matière par extinction au contact de l'eau, suivie de blutage, avec (chaux lourde) ou sans (fleur de chaux) réincorporation des grappiers moulus.

On peut d'ailleurs distinguer plusieurs sortes de chaux hydrauliques, suivant le temps que le produit, parfaitement éteint mais non éventé, gâché en pâte ferme et immergé immédiatement dans une eau tranquille et non aérée, met à terminer sa prise.

Les durées suivantes ont l'avantage de former à peu près une progression géométrique :

Chaux faiblement hydrauliques :	Fin de prise	entre 2 sem. et 1 mois;
Chaux moyennement hydrauliques :	»	entre 1 sem. et 2 sem.;
Chaux hydrauliques proprement dites :	»	entre 4 jours et 1 sem.;
Chaux éminemment hydrauliques :	»	en moins de 4 jours.

Si le produit contenait encore, par suite d'une extinction insuffisante, une petite quantité de chaux vive, celle-ci, en s'hydratant au contact de l'eau, provoquerait une élévation de température dont l'effet serait d'accélérer la prise. Pour une proportion plus importante de chaux non éteinte, la masse de pâte pourrait au contraire se boursoufler et devenir incapable de tout durcissement ultérieur.

B. Ciments. — Les ciments proviennent de la cuisson de calcaires *généralement* plus argileux que les chaux et dont la teneur en argile ne peut être inférieure à 18 pour 100 environ. Presque toujours leur couleur est plus foncée, leur densité plus forte, leur prise sous l'eau plus rapide et leur

résistance plus élevée que pour les chaux ; ils se distinguent d'ailleurs de ces dernières en ce qu'on emploie des moyens mécaniques pour les réduire en poudre.

Comme les chaux, nous diviserons les ciments en plusieurs catégories :

1° *Ciments de grappiers.* — Produits résultant du broyage, sans addition d'autres matières, de grappiers de chaux hydraulique débarrassés ou non au préalable des pierres non cuites et des scories. (Les grappiers sont les morceaux et les gros grains qui, ne s'étant pas pulvérisés pendant l'extinction, ont été éliminés par le blutage.)

Les ciments de grappiers forment une sorte de transition entre les chaux et les ciments et ont des propriétés comprises entre celles de ces deux classes de produits. Leur prise est généralement plus lente que celle des ciments et leur résistance, d'abord faible, croît progressivement avec le temps.

2° *Ciments à prise rapide.* — Produits obtenus par la cuisson relativement faible de calcaires fortement argileux et, en particulier, riches en alumine et en acide sulfurique. Ces ciments atteignent en quelques minutes une dureté assez considérable, mais qui ne croît plus que lentement dans la suite. On peut les distinguer d'ailleurs, suivant le mode d'obtention des matières premières, en ciments rapides naturels ou *ciments romains* et ciments rapides artificiels, appelés quelquefois *ciments prompts*, mais qui ne se rencontrent guère qu'à l'état d'exception.

3° *Ciments naturels à prise plus ou moins lente.* — Une cuisson plus forte des calcaires à ciment romain donne des ciments dont la prise est un peu plus lente et qu'on désigne parfois par le nom de *ciments à prise atténuée* ou encore de *ciments demi-lents*. Une cuisson plus forte encore, jointe à une diminution de la teneur en argile et surtout en alumine, fournit des produits prenant plus lentement (*ciments à prise lente*) et dont les propriétés peuvent se rapprocher beaucoup de celles du portland. Toutefois, nous croyons que les calcaires naturels ne présentent jamais une homogénéité comparable à celle des mélanges servant à la fabrication de ce

dernier produit, et qu'il convient de réserver la qualification de ciments portland exclusivement à des produits artificiels.

On ne doit d'ailleurs compter parmi les ciments naturels à prise demi-lente ou lente que les poudres obtenues par le broyage des matières cuites plus ou moins triées recueillies au pied des fours, sans aucun mélange de corps étrangers ou de composés hydrauliques d'une autre catégorie.

4° *Ciments portland* [1]. — Le *Cahier des Charges de Boulogne et de Calais* définit le ciment portland comme étant « produit par la mouture de roches scorifiées, obtenues au moyen de la cuisson, jusqu'à ramollissement, d'un mélange intime de carbonate de chaux et d'argile, rigoureusement dosé, chimiquement et physiquement homogène dans toutes ses parties ».

Cette formule indique implicitement que le ciment à fournir dans ces deux ports ne doit contenir que des roches parfaitement cuites et n'être additionné, après cuisson, d'aucune matière étrangère [2]. Nous pensons toutefois que, tout en refusant le nom de portland à tout ciment additionné de matières étrangères, quelles qu'elles soient, on doit au contraire le conserver aux produits marchands contenant, outre les roches parfaitement scorifiées qui doivent toujours rester en majorité, des morceaux de cuisson un peu moindre et certaines poussières bien cuites (*poussières lourdes*) qu'on recueille aussi au défournement. C'est ainsi que, dans le Boulonnais, beaucoup d'usines fabriquent plusieurs qualités

[1] L'orthographe de ce mot varie suivant les auteurs et même souvent dans le cours d'un même article. Il est évident, d'abord, qu'on ne doit pas dire *ciments de Portland*, puisque le nom de ville n'indique pas une origine. En ce qui concerne la majuscule et le signe du pluriel, nous croyons que, de même qu'on écrit *des chevaux isabelle* pour désigner des animaux dont la couleur rappelle celle de la chemise de l'archiduchesse Isabelle (voir Littré), on doit écrire *des ciments portland* pour désigner des ciments dont la couleur rappelait originairement celle de la pierre de Portland. C'est, du reste, dans ce sens que s'est prononcée la Commission des Méthodes d'Essai des Matériaux de Construction, consultée il y a quelques années à ce sujet.

Quand le mot est employé seul et substantivement, on doit, au contraire, écrire *des portlands*, de même qu'on écrit *des isabelles*, pour des chevaux isabelle, des *cognacs*, etc.

[2] Les ingénieurs et fabricants du nord et de l'est de l'Europe (Russie, Allemagne, Autriche et Suisse) reconnaissent encore le nom de ciment portland au mélange obtenu en ajoutant au produit des fours une dose de sulfate de chaux pouvant s'élever jusqu'à 2 pour 100.



ne différant, la plupart du temps, que par le plus ou moins de soin apporté au triage des produits extraits des fours [1].

Le *Cahier des Charges de Boulogne et de Calais* ne fixe aucune limite aux proportions d'argile et de carbonate de chaux du mélange avant cuisson, mais un article stipule que l'indice d'hydraulicité du ciment cuit ne peut être inférieur à 0,44. D'autre part, une définition donnée par les ingénieurs et fabricants du nord et de l'est de l'Europe, limite à 1,7 la proportion minimum de chaux combinée à un poids 1 d'éléments hydrauliques, ce qui revient à dire que l'indice d'hydraulicité ne doit pas être supérieur à 0,60.

M. H. Le Châtelier, se basant sur la composition des principaux sels simples dont il a cru reconnaître la présence dans les ciments, indique pour la composition normale des ciments portland les limites définies par les deux inégalités suivantes, dans lesquelles les symboles chimiques représentent les quotients des proportions pondérales des éléments correspondants par les équivalents chimiques de ces corps :

$$\frac{CaO+MgO}{SiO^2-Al^2O^3-Fe^2O^3+\frac{1}{3}SO^3}>3, \quad \text{et} \quad \frac{CaO+MgO}{SiO^2+Al^2O^3+\frac{1}{3}SO^3}<3.$$

En pratique, la teneur en argile des mélanges crus varie généralement, suivant les pays, entre 19 et 25 pour 100. La température nécessaire à la cuisson dépend alors de la proportion et de la composition de l'argile, et évidemment les produits obtenus ne sont pas tous de même qualité. Cependant, tant qu'on ne sort pas de ces limites et que les autres conditions exposées ci-dessus sont en même temps remplies, on peut conserver aux produits obtenus le nom de ciments portland.

Le ciment portland est une poudre grise, dont le poids spécifique, supérieur à celui des autres composés hydrau-

[1] Les trois principales qualités fabriquées ont reçu les noms de *ciment dallage*, livré en sacs munis de deux plombs, *première qualité*, avec un seul plomb, et *qualité à maçonner*, vendue sans marque de fabrique. Souvent on ajoute la mention *garanti pur*, indiquant que le ciment n'a été additionné après cuisson d'aucune matière étrangère plus ou moins inerte.

liques, varie presque toujours entre 3,05 et 3,16. Il fait prise sous l'eau en quelques heures et a la réputation d'atteindre, qu'on l'emploie pur ou mélangé avec du sable, des résistance plus fortes que les autres produits employés de même.

Bien fabriqué, il ne doit pas varier de volume, même dans l'eau de mer, et sa principale supériorité est de mieux supporter l'action destructive de cet élément que la plupart des autres composés hydrauliques. Aussi n'a-t-il pas tardé à jouir, malgré son prix plus élevé, d'une grande faveur auprès des ingénieurs et des constructeurs, et une des conséquences de cette renommée a été de faire donner improprement le nom de ciments portland à une foule de produits différant complètement de celui qui vient d'être défini.

5° *Ciments mixtes*. — Nous appellerons indistinctement ciments mixtes tous les composés résultant du mélange, après cuisson, de matières de provenances diverses, les unes hydrauliques, les autres pouvant ne pas l'être. Nous les diviserons d'ailleurs en trois classes, savoir :

a) Les *ciments mixtes proprement dits*, mélanges de composés hydrauliques de différentes classes, parmi lesquels on peut citer, par exemple, des composés de ciment rapide et de grappiers de chaux hydrauliques, auxquels certains fabricants donnent improprement le nom de ciments portland artificiels.

b) Les *ciments additionnés*, obtenus par l'introduction dans un ciment quelconque de proportions plus ou moins considérables de matières destinées soit à en modifier certaines propriétés, comme par exemple du sulfate de chaux, soit simplement à en abaisser le prix de revient, comme du mâchefer, des laitiers ordinaires, du sable, des pierres, etc. Surtout dans ce second cas, il est rare que le ciment additionné soit vendu comme tel, et on se trouve en présence d'une véritable fraude.

c) Les *ciments-pouzzolanes*, mélanges intimes, obtenus par un broyage mécanique de matières pouzzolaniques avec des chaux hydrauliques ou non, ou même avec des ciments.

La subdivision de beaucoup la plus importante de ce groupe est celle des *ciments de laitier*, dans la composition

desquels entre la chaux grasse ou hydraulique et certains laitiers basiques de haut-fourneau amenés par refroidissement brusque à un état physique spécial.

On doit aussi y ranger un produit tout nouveau, appelé *sand-cement*, *ciment amaigri* ou *silico-ciment*, et obtenu en broyant à une extrême finesse un mélange de ciment et de sable siliceux.

Nous aurons l'occasion de revenir plus loin sur cette matière.

C. Pouzzolanes. — Les pouzzolanes sont des matières généralement riches en silice, qui se distinguent des chaux et des ciments en ce que, gâchées seules avec de l'eau, elles sont incapables de faire prise par elles-mêmes. Mais, si on les a mélangées préalablement avec de la chaux, elles se combinent partiellement avec elle après l'emploi et en activent le durcissement. C'est ainsi que, par l'addition de pouzzolane, on peut employer sous l'eau la chaux grasse elle-même.

Les progrès de l'industrie du ciment ont fort restreint l'usage des pouzzolanes, qui ne donnaient jamais que des mortiers durcissant très lentement et incapables d'atteindre des résistances aussi élevées que ceux de ciment. Il est vrai que la manière dont on les emploie, à l'état de sable contenant encore beaucoup de gros grains, n'utilise qu'une faible proportion des principes actifs qu'elles contiennent.

On attribue leur action à un état particulier d'une partie de leur silice, qui la rendrait assimilable. Quant au rôle que peuvent jouer les autres éléments chimiques qu'on y rencontre le plus souvent, et plus particulièrement l'alumine, malgré les recherches de Vicat, il est encore mal défini.

On constate d'ailleurs fréquemment des pouvoirs pouzzolaniques très différents pour des matières de même composition chimique élémentaire se rencontrant dans des localités voisines et présentant sensiblement le même aspect.

Les pouzzolanes se répartissent en deux groupes qui sont :

1° Les *pouzzolanes naturelles*, matières d'origine généralement volcanique, parmi lesquelles on peut citer les pouz-

zolanes d'Italie (Naples et Rome), de Santorin, des Açores, et le trass des bords du Rhin. En France, diverses matières jouissent de propriétés pouzzolaniques : telles sont diverses laves du Cantal, la gaize des Ardennes, certaines arênes, etc.

2° Les *pouzzolanes artificielles*, résultant pour la plupart de la cuisson de schistes ou d'argiles, et dont la plus connue, la seule qu'on emploie encore un peu, est le ciment de tuileau, et s'obtient par la pulvérisation de briques ou de tuiles. A cette classe appartiennent aussi le mâchefer, les cendres de divers combustibles, certains laitiers de haut-fourneau tels que ceux qui servent à la fabrication du ciment de laitier, divers autres résidus industriels, etc.

Pour ne plus avoir à revenir sur la question des pouzzolanes, disons tout de suite que Vicat appréciait leur qualité d'après la durée de prise des mortiers qu'elles donnaient avec la chaux grasse et la proportion de chaux qu'elles enlevaient à des dissolutions de cette matière.

Aujourd'hui, on se contente de les juger d'après leur aspect, leur provenance et surtout le degré de confiance qu'on a dans le fournisseur.

En résumé, on peut condenser comme il suit en un tableau synoptique la classification qui vient d'être établie :

CHAUX	*Chaux non hydrauliques*	Chaux grasses.
		Chaux maigres.
	Chaux hydrauliques	Chaux faiblement hydrauliques.
		Chaux moyennement hydrauliques
		Chaux hydrauliq. proprement dites.
		Chaux éminemment hydrauliques.
CIMENTS	*Ciments de grappiers*	Ciments de grappiers.
	Ciments à prise rapide	Ciments romains (naturels).
		Ciments prompts (artificiels).
	Ciments naturels à prise plus ou moins lente	Ciments atténués ou demi-lents.
		Ciments naturels à prise lente.
	Ciments portland	Ciments portland (diverses qualités)
	Ciments mixtes	Ciments mixtes proprement dits.
		Ciments additionnés.
		Ciments pouzzolanes (ciments de laitier, etc.)
POUZZOLANES	*Pouzzolanes naturelles*	Pouzzolane d'Italie.
		Trass.
		Terre de Santorin.
		Gaize.
		Etc.
	Pouzzolanes artificielles	Terres cuites (tuileau).
		Laitiers granulés.
		Etc.

M. Le Châtelier indique, pour les principaux de ces corps, les compositions moyennes suivantes :

	SILICE	ALUMINE	OXYDE DE FER	CHAUX	MAGNÉSIE	ACIDE SULFURIQUE	EAU ET ACIDE carboniq.
Meilleures chaux hydrauliques[1].......	22	2	1	63	1,5	0,5	10
Ciments de grappiers.	26,5	2,5	1,5	63	1	0,5	5
Ciments naturels à prise rapide........	22 à 24	7 à 10	4 à 6	45 à 55	1 à 5	2 à 4	4 à 8
Ciments portland marchands de bonne qualité	21 à 24	6 à 8	2 à 4	60 à 65	0,5 à 2	0,5 à 1,5	1 à 3
Ciments de laitier de bonne qualité......	24	14	1	51	2	1	7

[1] Pour les chaux de qualité inférieure, la teneur en silice peut s'abaisser à la moitié de la valeur indiquée dans ce tableau, et même l'eau et parfois l'alumine peuvent doubler; la teneur en chaux reste toujours à peu près la même et varie entre 55 et 65 pour 100.

12. Composés divers. — Les produits qui viennent d'être décrits sous les noms génériques de chaux, ciments et pouzzolanes ne sont pas les seuls qui jouissent de la propriété de faire prise par eux-mêmes ou d'activer le durcissement de produits d'un autre groupe.

Composés chimiques simples. — Un grand nombre de sels, mouillés d'une faible quantité d'eau, sont également susceptibles d'acquérir une certaine cohésion. M. Le Châtelier a montré que ce phénomène était dû, comme d'ailleurs aussi pour les ciments, à l'existence, pour ces composés, d'hydrates de solubilités différentes, dont le plus soluble donne rapidement une solution sursaturée, au sein de laquelle cristallisent d'autres hydrates de solubilité moindre, en même temps que de nouvelle eau est remise en liberté et permet aux mêmes phénomènes de se renouveler sans discontinuité jusqu'à épuisement du composé initial.

Parmi les composés chimiques simples jouissant de cette propriété, M. Le Châtelier cite notamment le sulfate de soude, l'acétate de soude, l'hyposulfite de soude, les alumi-

nates de chaux, le silicate de baryte et le sulfate de chaux. Il a fait une étude toute spéciale de la prise de ces deux derniers corps [1].

Plâtre. — Le dernier n'est d'ailleurs autre que le plâtre, qui est employé couramment en architecture.

Le plâtre résulte de la calcination du gypse, hydrate à 2 équivalents d'eau, à une température comprise entre 120° et 130°. Ainsi préparé, il n'est pas anhydre, comme on l'a cru pendant longtemps, mais retient encore 1/2 équivalent d'eau (Le Châtelier).

Sa prise est plus rapide que celle des chaux et ciments et, contrairement à ces composés, on ne l'emploie jamais que pur, c'est-à-dire sans aucun mélange de sable. Il n'est pas hydraulique et se dissout progressivement au contact de l'eau.

Nous n'aborderons pas ici l'étude de ce produit, qui a été faite d'une manière très complète dans cette *Encyclopédie* même [2] et dans l'*Encyclopédie chimique* [3] par les plumes particulièrement compétentes de M. Denfer et de M. Duquesnay. Aucune modification n'est d'ailleurs survenue depuis lors dans sa fabrication ni dans son emploi. Seules les recherches théoriques de M. Le Châtelier, auxquelles il vient d'être fait allusion, sont venues jeter un nouveau jour sur sa composition et le mécanisme de sa prise.

Ciment Sorel. — Si l'on met de l'oxyde de zinc en poudre en contact avec du chlorure de zinc liquide ou des dissolutions de chlorure de fer, de magnésium, de nickel ou de cobalt, ou même encore avec une dissolution d'acide chlorhydrique, il se forme un oxychlorure qui, par sa cristallisation, provoque la prise du mélange en une masse dure et insoluble.

Ce ciment a été employé avec succès à la restauration de divers monuments de Paris, notamment pour boucher les trous des pierres de taille [4].

[1] *Annales des Mines*, mai-juin 1887.
[2] *Encyclopédie des Trav. publics : Maçonnerie*, chap. XII.
[3] *Calcaires, Chaux, Ciments et Mortiers*, pp. 156 à 181.
[4] On l'emploie également pour le plombage des dents.

Dans la pratique, on l'obtient en mélangeant, au moment de l'emploi, une poudre et un liquide présentant les compositions suivantes :

La poudre est formée en poids de 40 pour 100 d'oxyde de zinc, 40 pour 100 de calcaire dur écrasé et 20 pour 100 de grès pilé, le tout additionné de la quantité d'ocre jugée convenable pour obtenir la teinte voulue et broyé intimement.

Le liquide s'obtient en dissolvant jusqu'à refus du zinc dans l'acide chlorhydrique du commerce, ajoutant un poids de chlorhydrate d'ammoniaque égal au sixième du poids de zinc dissous et étendant la liqueur des deux tiers de son volume d'eau.

Le volume de liquide à prendre pour 1 kilogramme de poudre est de 3 litres.

Autres compositions. — On trouve assez souvent dans les revues spéciales des recettes nouvelles pour obtenir des composés capables de faire prise à la manière des ciments et se prêtant à diverses applications industrielles.

En général leur usage est fort limité, surtout en ce qui concerne plus directement les maçonneries. On pourrait arriver à en dresser la liste en compulsant les brevets d'invention depuis une vingtaine d'années. Nous n'entreprendrons pas ce travail vraisemblablement hors de proportion avec l'utilité des résultats qu'on pourrait en tirer.

Enduits chimiques. — De même que les pouzzolanes empêchent le délavage de la chaux et en augmentent la dureté, par suite des composés insolubles formés avec cette base par certains de leurs éléments, tels que la silice, jouant le rôle d'acides vis-à-vis d'elle, on peut obtenir des mélanges capables de durcir assez rapidement en gâchant la chaux avec certaines dissolutions salines donnant lieu à des réactions analogues.

C'est ainsi par exemple que Kuhlmann a proposé, en 1841, de préparer par voie humide, au moyen de dissolutions de silicates et d'aluminates alcalins, des chaux hydrauliques dont on pourrait régler à volonté le degré d'hydraulicité.

Toutefois, l'usage a prévalu de n'appliquer ces liquides que sur les maçonneries déjà construites, et principalement sur les pierres, dans le but de boucher leurs pores et d'augmenter leur dureté.

Ce mode de silicatisation est encore employé couramment.

De même, on a enduit les maçonneries d'eau de baryte, dont la carbonatation à l'intérieur de leurs cavités produisait un effet analogue.

Il y a quelques années, on a reproché à ces procédés, notamment à l'emploi des silicates, de laisser dans les matériaux traités les alcalis mis en liberté, qui salinifient la pierre, la tachent et lui donnent une tendance à se charger d'une humidité dont la croûte superficielle durcie ne permet plus l'évacuation, et, par suite, à se désagréger rapidement sous l'action de la gelée. On a proposé de substituer à ces sels des dissolutions de fluosilicates (fluates) ayant pour formule générale $Si^2Fl^9M^3$ (M = métal), qui, au contact du carbonate de chaux, donneraient du fluorure de calcium, de la silice, de l'oxyde métallique et de l'acide carbonique. Ce gaz, en se dégageant, ménagerait dans la masse consolidée quelques pores, par lesquels l'humidité pourrait s'échapper ultérieurement sous l'influence de la chaleur et de la gelée. Des expériences de laboratoire faites sur des pierres ainsi traitées ont montré qu'elles étaient moins poreuses et plus résistantes qu'avant la fluatation. Le plus souvent, le sel employé est le fluate de magnésie. Le mode d'application consiste à badigeonner les surfaces à enduire de plusieurs couches données avec des solutions de plus en plus riches en sel.

On peut rattacher au même ordre d'idées la solution préconisée par Vicat et la plupart de ses continuateurs pour obvier aux graves inconvénients résultant de la pénétration de l'eau de mer dans les mortiers, et qui consiste à favoriser par tous les moyens possibles le dépôt d'incrustations végétales et animales contre les parois des ouvrages et la carbonatation de la chaux à la surface des maçonneries. Toutefois, nous ne connaissons pas de cas où

l'on ait songé à provoquer artificiellement cette carbonatation [1].

Laissant de côté, dans ce qui va suivre, les diverses catégories de produits qui viennent d'être énumérées en dernier lieu, de même que les pouzzolanes, nous ne nous occuperons plus désormais que des chaux et des ciments.

Nous poursuivrons d'ailleurs leur étude parallèlement, nous bornant à signaler, quand ce sera nécessaire, les différences existant entre ces matières.

[1] Des recherches faites dans ce sens nous ont montré qu'il y avait souvent avantage à gâcher les mortiers avec de l'urine.

Ce liquide contient en effet, par litre, environ 20 à 30 grammes d'urée, susceptible de produire, au contact de la chaux libre, 15 à 22 grammes d'acide carbonique, d'après la formule : $C^2H^4Az^2O^2 + 2HO = C^2O^4 + 2AzH^3$.

Le dégagement d'ammoniaque pendant le gâchage se perçoit d'ailleurs facilement à l'odorat.

Il serait intéressant de faire l'expérience sur une plus grande échelle, soit en employant l'urine pour le gâchage, soit en badigeonnant de ce liquide les mortiers déjà en œuvre depuis un temps plus ou moins long.

CHAPITRE III

FABRICATION

§ 1. — Fabrication des chaux et des ciments de grappiers

13. Matières premières. — Comme il a été dit plus haut, on ne fabrique plus guère actuellement que des chaux naturelles. Le nombre des gisements de calcaires capables de produire des chaux de toutes sortes est, en effet, considérable, et il n'est guère de département qui n'en soit pourvu.

L'exploitation se fait la plupart du temps à ciel ouvert, et l'on doit avoir soin de mélanger les pierres des différentes parties de la carrière, de manière à corriger autant que possible les irrégularités locales de composition qui peuvent se rencontrer, et à obtenir ainsi dans chaque usine un produit de composition à peu près constante.

Une autre précaution consiste à n'employer que des morceaux bien nets sans petits débris ni poussières, qui formeraient dans les fours des masses compactes s'opposant au libre passage des gaz et au tirage régulier, d'où résulterait une augmentation de la proportion d'incuits.

De même, on évite souvent d'enfourner des pierres humides, qui se désagrégeraient par la brusque expulsion de leur eau et produiraient le même inconvénient.

Les morceaux doivent d'ailleurs être d'autant moins gros que le calcaire est plus compact, pour que la chaleur se propage facilement jusqu'à leur centre.

14. Cuisson. — La cuisson des chaux a été étudiée d'une manière toute spéciale par M. Petot[1]. Elle a souvent été décrite en détail, notamment par M. Duquesnay[2] et par M. Durand-Claye[3], auxquels nous empruntons la plupart des renseignements qui suivent.

Selon la nature du combustible dont on dispose, on peut adopter divers modes de cuisson nettement différents. Dans tous les cas, il importe que la matière soit portée à une température suffisamment élevée pour que la dissociation du carbonate de chaux soit complète, ce qui exige en même temps qu'il s'établisse un courant gazeux capable d'entraîner l'acide carbonique dégagé. Autrement, la dissociation s'arrêterait dès que ce gaz aurait atteint une certaine tension, d'ailleurs variable suivant la température.

On facilite souvent le dégagement de l'acide carbonique en faisant traverser la masse par un courant de vapeur d'eau.

Pour que la cuisson soit suffisante, il faut que le calcaire soit porté à une température voisine du rouge blanc ; aussi doit-il être protégé du refroidissement par une enveloppe suffisamment peu conductrice. De là la grande épaisseur qu'on donne généralement aux parois des fours, comme aussi leur forme circulaire, qui correspond au minimum de surface extérieure. Pour la même raison, on fait généralement en sorte d'adosser les fours à un escarpement, voire même de les entailler dans le terrain, de manière qu'ils soient contrebutés sur plusieurs de leurs faces, ce qui diminue les pertes de chaleur par rayonnement, tout en rendant également faciles l'accès de la partie supérieure et celui de la partie inférieure du four.

Les fours à chaux se distinguent en fours à longue flamme et fours à courte flamme et peuvent fonctionner d'une manière intermittente ou continue.

1° Cuisson intermittente a courte flamme. — C'est là le système le plus primitif : on superpose des couches alterna-

[1] Petot, *Essai sur la Chaufournerie*. Paris, 1833.
[2] *Calcaires, Chaux, Ciments, Mortiers* (*Encyclopédie chimique*), 1883.
[3] *Chimie appliquée à l'art de l'ingénieur*, 1re édition, 1885.

tives de pierre et de combustible, en ayant soin de mettre en dessus les plus gros morceaux, qui cuiront ainsi pendant plus longtemps, puis on allume au-dessous du tas un feu de branchages qui ne tarde pas à se propager dans toute la masse.

En général, la cuisson est terminée au bout de trois à quatre jours, et le four est bon à tirer.

Dans cette opération, on doit avoir soin de séparer les morceaux de chaux des cendres du combustible.

Dans bien des cas où il s'agit simplement d'obtenir la chaux nécessaire pour un ouvrage déterminé, le four est établi d'une manière provisoire. Il arrive même qu'on se dispense de toute paroi maçonnée et qu'on se contente de recouvrir le tas des matières à cuire d'une couche de terre ou de gazon, dans laquelle on pratique ultérieurement de place en place des ouvertures destinées à répartir le tirage aussi uniformément que possible dans toute la masse. Ces fours rudimentaires ont reçu le nom de *fours de campagne*.

2° Cuisson intermittente a longue flamme. — Pour ce genre de cuisson, le four est généralement muni, à sa partie inférieure, d'une ouverture unique, au-dessus de laquelle on établit, avec des moellons du calcaire à cuire, une voûte à claire-voie destinée à supporter toute cette matière.

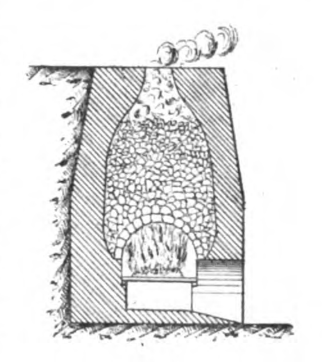


Fig. 37.

Les plus gros morceaux sont disposés à la partie inférieure et les plus petits au pourtour et au dessus, c'est-à-dire dans les régions où la température sera le moins forte. Sous cette voûte on allume un feu de menu bois, que l'on entretient, faible d'abord, puis plus vif, jusqu'à cuisson complète.

La cuisson proprement dite dure environ trois jours. Après un ou deux jours de refroidissement, on démolit la voûte et la chaux tombe sur la sole où on la ramasse.

L'épaisseur totale des matières à cuire ne doit pas avoir plus de 3 à 4 mètres. Par contre, la perte de chaleur est d'autant moindre que le diamètre est plus grand.

Ce modèle de four, encore assez rudimentaire, a reçu divers perfectionnements, tels qu'un couvercle et une toiture destinés à le protéger des intempéries; de même, on a évité la construction d'une voûte de moellons à chaque fournée, en séparant d'une manière permanente, par une grille en fer, le foyer de la partie réservée aux pierres à chaux (four Finck, four Deblinne et Donop).

Enfin on a songé, mais sans résultats bien satisfaisants, à multiplier les foyers, soit à un même niveau dans diverses orientations (four Vicat), soit sur deux étages différents (four Petot), afin de mieux répartir la cuisson en largeur ou en hauteur dans les diverses parties du four.

On reconnaît que la chaux est bien cuite au tassement produit dans le four, à la couleur de la fumée, à l'absence d'effervescence de la chaux par les acides, à son extinction par l'eau, à la facilité avec laquelle on peut, sans éprouver trop de résistance, introduire dans le four une barre de fer et, plus simplement encore, à la couleur du produit cuit; cette couleur, nettement caractérisée pour chaque chaux, dépend des éléments étrangers qu'elle renferme et du degré de cuisson qu'elle a atteint.

3° Cuisson continue a longue flamme. — Ce mode de cuisson exige que le four présente, à sa partie inférieure, deux orifices, réservés l'un à l'introduction du combustible, l'autre à l'extraction de la chaux cuite.

Un premier système consiste à établir, à une certaine hauteur au-dessus de la sole, une voûte à claire-voie en briques réfractaires qui sépare le four en deux parties. La chambre inférieure est le foyer, la chambre supérieure est la cuve ou le four proprement dit (*fig.* 38).

Les deux portes dont il vient d'être question s'ouvrent, la première au niveau du sol, la seconde immédiatement au-dessus de la voûte.

Le four étant en marche, quand on suppose la partie infé-

rieure de la charge suffisamment cuite, on ouvre la porte P, on tire une partie de la chaux avec un crochet et on referme. On charge de nouveau calcaire par le gueulard et on continue à entretenir le feu sous la voûte.

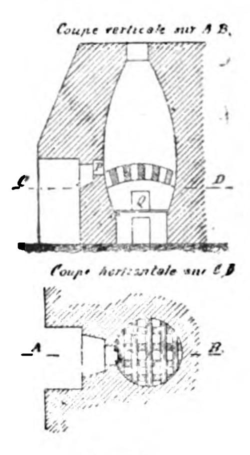


Fig 38.

Le principal inconvénient de ce système est l'énorme perte de chaleur résultant de l'entrée d'air froid à chaque nouveau défournement.

Aussi préfère-t-on le dispositif inverse, qui consiste à placer le foyer latéralement, de façon que l'entrée des gaz chauds se fasse par la porte P. La voûte est alors supprimée et la chaux descend verticalement jusqu'au sol où on la prend par la porte inférieure Q, complètement refroidie par la colonne d'air qui l'a traversée, allant reporter dans le four la chaleur qu'elle lui a prise.

Pour régulariser la cuisson, on donne souvent au foyer une forme telle que l'entrée des gaz chauds se produise simultanément par plusieurs portes ménagées à un même niveau horizontal à égale distance les unes des autres autour de la périphérie du four.

Il y a avantage à ce que la hauteur de la colonne de matière enfournée soit suffisante pour que les gaz sortent froids par le gueulard. Toutefois, une hauteur trop grande nuirait au tirage.

Quant à la disposition générale du four, elle est très variable; on peut s'en rendre compte par les descriptions détaillées, données par M. Duquesnay, des fours de Rüdersdorf, près de Berlin, de ceux de M. Chanard, de M. Raucourt et de M. Simoneau.

Parfois, on a remplacé les combustibles solides à longue flamme par des combustibles gazeux produits dans des gazogènes spéciaux (four Steinmann, four Vigreux et Leroy-Desclauzages) ou recueillis au gueulard de hauts-fourneaux ou à la sortie de fours à coke.

Enfin, on peut ranger encore dans la catégorie des fours continus à longue flamme appliqués à la cuisson des chaux, les fours à circulation, tels que le four Hoffmann, qui sera décrit plus loin à propos de la fabrication des ciments proprement dits, et le four Swann, dans lesquels les gaz chauds parcourent successivement une série de chambres remplies de calcaire ; inversement, dans le four continu à tunnel de Bock, des wagonnets de calcaire traversent successivement une zone portée à une haute température.

4° Cuisson continue a courte flamme. — Malgré la grande variété des fours à longue flamme, la plupart des usines importantes ont maintenant une tendance à leur préférer, surtout pour la fabrication de la chaux hydraulique, les fours coulants à courte flamme, dans lesquels on est moins gêné par le choix du combustible.

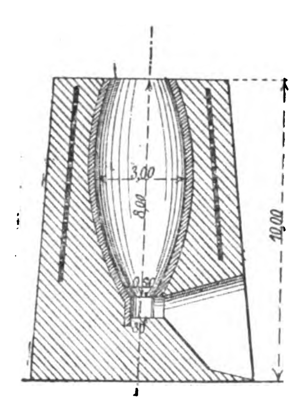


Fig. 39.

On emploie alors, suivant les cas, le charbon de bois, le coke, la houille sèche ou l'anthracite. Le combustible devant être mis en contact immédiat avec le calcaire, on opère par couches alternatives, dont les épaisseurs relatives dépendent à la fois de la nature de ces deux matières.

La forme des fours est très variable : tantôt la cuve est un tronc de cône renversé, tantôt, pour avoir de moindres déperditions de chaleur, on rétrécit le gueulard, en surmontant le tronc de cône d'une partie cylindrique ou encore d'un autre tronc de cône en sens inverse. En arrondissant les lignes, on obtient la forme ovoïde, la plus usitée aujourd'hui pour les fours continus. La figure 39 ci-dessus représente un four de cette forme, du modèle adopté à l'usine de Paviers.

La figure 40 représente de même le type de fours employés maintenant à l'usine du Teil.

Pour mettre un four en marche, on l'allume par dessous, et

le feu se propage progressivement de bas en haut en provoquant un affaissement de la masse ; on achève de le charger et, quand on juge que la partie inférieure est suffisamment cuite, on commence à tirer la chaux. Avec certains fours, tels que ceux établis à Malain pour la construction du chemin de fer de Paris à Lyon, cette opération s'effectue par des ouvertures spéciales ménagées dans leurs parois au-dessus de la grille ; mais, le plus souvent, on supprime ces ouvertures latérales et on se contente d'enlever les barreaux de la grille, de manière à faire tomber la matière sur le sol, d'où on la retire à des intervalles déterminés. Dans ce cas, la grille ne sert que pour l'allumage.

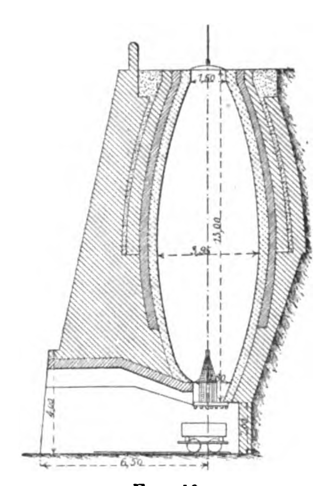


Fig. 40.

Un perfectionnement, que l'usine du Teil a fait breveter, consiste à surmonter la grille, qui est à barreaux mobiles, d'une autre grille en fer, en forme de cône, servant de diviseur de charge et, en même temps, de tuyau d'aérage.

En général on tire, chaque jour, environ un tiers ou un quart du four, après quoi on achève de le remplir avec de nouvelles couches de calcaire et de combustible.

Le volume des fours est très variable suivant les usines. Théoriquement, les fours les plus grands devraient être les plus économiques, par suite de la moindre déperdition de chaleur. En fait, la hauteur varie ordinairement entre 7 et 13 mètres, et la capacité atteint jusqu'à 75 mètres cubes.

L'allure de la cuisson est assez difficile à régler, par suite des variations de tirage pouvant provenir du vent, de la disposition des pierres dans le four, de dégradations de l'enveloppe, de différences de qualité du combustible, etc. On ne doit d'ailleurs jamais interrompre la marche d'un four. Si,

pour une raison quelconque, on est obligé d'arrêter momentanément, on doit boucher soigneusement toutes les ouvertures, étouffer le feu, comme disent les ouvriers, et s'opposer par tous les moyens possibles au refroidissement de la masse. On a en effet constaté ce fait, encore mal expliqué, que, quand la température vient à s'abaisser notablement avant que la cuisson soit complète, il est presque impossible ensuite, quelle que soit la température employée, de chasser le reste de l'acide carbonique pour terminer l'opération.

15. Extinction. — La chaux est fournie par les fabricants soit en pierre, soit en poudre. Quand elle est en poudre, on livre avec elle l'eau qui a servi à l'éteindre, eau dont on ne connaît pas toujours la proportion et qui grève le produit d'un supplément de frais de transport.

Au contraire, en achetant la chaux en pierre, on risque de recevoir en même temps des morceaux insuffisamment ou trop cuits, qui constituent souvent un déchet assez important. En outre, cette matière est très avide d'eau et gonfle en s'hydratant, ce qui en rend le transport assez difficile. Aussi ce mode de livraison devient-il de plus en plus rare et est-il abandonné dans toutes les grandes usines.

Qu'elle soit pratiquée par le fabricant ou par le consommateur, l'extinction peut être provoquée de différentes manières.

La méthode dite *par immersion*, préconisée par Vicat, consiste à introduire les morceaux de chaux vive dans des paniers à claire-voie qu'on plonge dans l'eau pendant quelques secondes. La chaux, abandonnée ensuite à elle-même, ne tarde pas à tomber en poussière.

Ce procédé, à peu près abandonné aujourd'hui, est remplacé par la méthode dite *par aspersion*. Les pierres de chaux sont amenées dans des hangars, appelés chambres d'extinction, où on les arrose avec des arrosoirs à pomme, puis mises en tas. L'extinction se produit rapidement avec un grand dégagement de chaleur et de vapeur d'eau. Toutefois, pour qu'elle soit complète, on doit la laisser se continuer pendant une à deux semaines, de manière à permettre à

l'action de l'eau de se faire sentir sur les morceaux plus cuits ou plus argileux.

On a d'ailleurs remarqué que l'extinction se produisait d'une manière d'autant plus énergique que la masse des roches traitées à la fois était plus considérable. Par exemple, si, dans un laboratoire, on opère sur quelques morceaux seulement de chaux vive, on a beaucoup de difficulté à les éteindre convenablement, surtout s'ils proviennent d'un calcaire compact. Ce phénomène est dû à l'influence simultanée de la chaleur et de la vapeur d'eau, qui toutes deux activent l'hydratation.

Dans les grandes masses de chaux, le refroidissement extérieur est relativement faible et la température peut s'élever jusqu'à 300°. On doit alors conduire l'opération avec précaution et ajouter l'eau à plusieurs reprises pour compenser les pertes résultant de sa volatilisation. Pour la même raison, l'usage de l'eau chaude doit être recommandé.

Le défaut le plus grave et le plus fréquent des chaux est une insuffisance d'extinction. Dans ce cas, l'hydratation s'achève dans le mortier déjà plus ou moins durci, et le gonflement qui l'accompagne tend à désagréger la maçonnerie.

Quand il s'agit de chaux grasses, il est avantageux d'ajouter une proportion d'eau plus forte que celle qui suffirait à l'extinction, de manière à les réduire en une pâte (*extinction en pâte*) que l'on conserve dans des fosses, recouverte de sable, jusqu'au moment de l'emploi. La qualité se trouve améliorée par suite de l'extinction progressive de tous les grains plus paresseux, et la pâte peut être ainsi conservée pendant des siècles.

16. Blutage. — Quand on juge que la chaux en poudre est suffisamment éteinte, on la jette sur des grilles destinées à retenir les gros morceaux restants, qui se composent surtout de pierres insuffisamment cuites ; puis on l'envoie dans des bluteries pour la débarrasser des gros grains qu'elle contient encore.

En général, les bluteries sont constituées par de longs tambours à section polygonale dont les faces sont garnies de toiles métalliques, protégées intérieurement par des grilles ou des toiles à mailles plus larges et plus résistantes. Ces tambours sont animés d'un mouvement lent de rotation

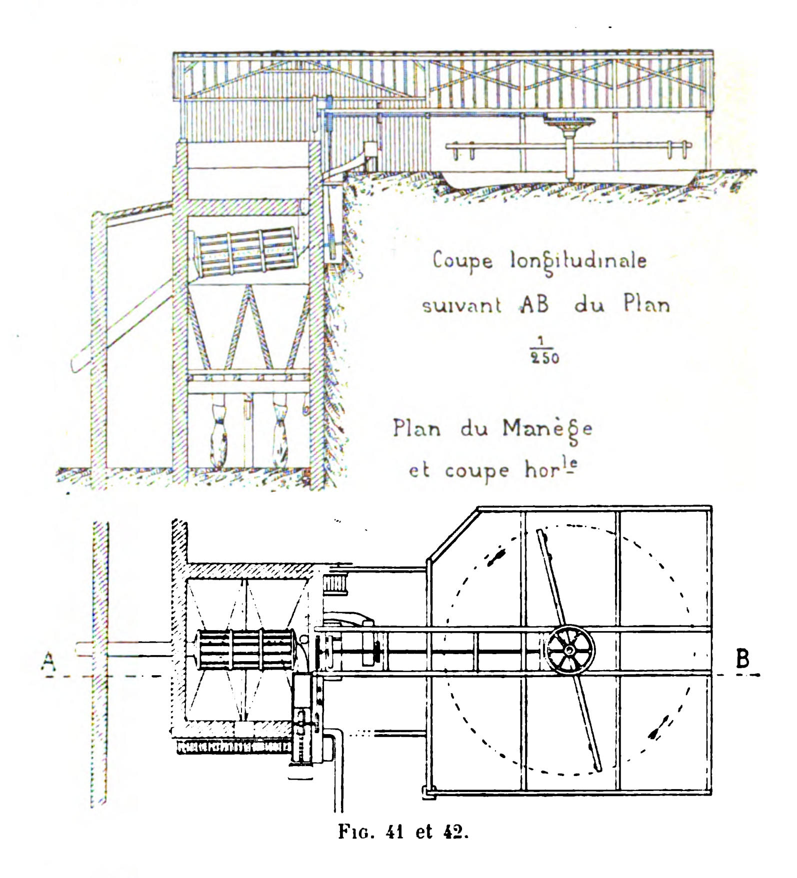


Fig. 41 et 42.

autour de leur axe, qui est légèrement incliné sur l'horizon.

La chaux, introduite d'une manière continue par la partie la plus élevée, est entraînée par la rotation de l'appareil et laisse passer à travers les toiles toute sa partie fine que l'on recueille et que souvent on livre telle quelle au commerce sous le nom de chaux légère ou fleur de chaux.

Les grains refusés s'échappent par la partie inférieure du tambour. Ils portent le nom de grappiers et sont composés d'incuits, de débris mal éteints et, principalement dans le cas des chaux hydrauliques, de parties plus argileuses ou plus cuites, où la chaux se trouve à un état de combinaison plus avancé avec la silice ou l'alumine, et dont la composition se rapproche plus ou moins de celle des ciments.

Les figures 41 et 42 ci-contre représentent en coupe et plan la bluterie de l'usine de Paviers.

Parmi les autres modes de blutage, nous citerons seulement le système par ventilation (système Trolliet breveté s. g. d. g.) employé à l'usine de Bons, dont M. Gobin a donné la description [1].

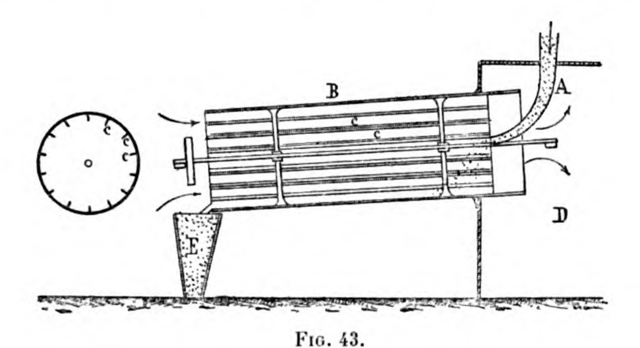


Fig. 43.

Les matières pulvérisées sont amenées, au moyen d'un tube A (*fig.* 43), à l'extrémité d'un cylindre en tôle B de 1m,50 de longueur et de 0m,55 de diamètre, garni à l'intérieur de petites ailettes *cc* disposées suivant ses génératrices, et traversé dans sa longueur par un courant d'air marchant, comme l'indiquent les flèches, en sens inverse de la chaux. Par suite de la rotation du cylindre autour de son axe, qui est situé dans une position presque horizontale, la chaux est constamment relevée par les ailettes et répandue en nappes minces à travers le courant d'air, qui en entraîne les parties les plus fines dans une chambre contiguë D, tandis que les

[1] Gobin, *Étude sur la Fabrication des Chaux hydrauliques dans le bassin du Rhône* (*Ann. des Ponts et Chaussées*, octobre 1887).

grappiers gagnent progressivement l'extrémité inférieure du cylindre, où on les recueille en E.

D'après M. Gobin, les avantages de ce système sont la suppression des toiles métalliques, qu'il faut souvent réparer, la faiblesse de la force motrice consommée, l'absence de poussières, la facilité de régler la finesse par des courants d'air plus ou moins forts, le bon fonctionnement de l'appareil et la régularité du blutage produit.

17. Traitement des grappiers. — La composition des grappiers varie suivant la nature de la chaux et le soin apporté à sa fabrication. Avec les chaux peu hydrauliques, ils sont composés surtout d'incuits et de parties mal éteintes. De même, si l'action du feu n'a pas été bien réglée, la proportion de grains analogues au ciment est faible, et le meilleur parti à prendre est de rejeter les grappiers, après leur avoir fait rendre au besoin, par une nouvelle extinction, une partie de la chaux qu'ils contiennent encore.

Dans un certain nombre d'usines, les grappiers sont broyés, puis renvoyés dans les bluteries, où ils se mélangent à la chaux arrivant directement des chambres d'extinction. C'est là une pratique défectueuse, en ce qu'on risque d'introduire ainsi dans la chaux des éléments mal éteints qui en rendent l'emploi dangereux. Il convient de soumettre au préalable les grappiers à une nouvelle extinction suffisamment prolongée, comme cela se pratique dans les principales usines. La chaux additionnée de poudre de grappiers reçoit le nom de chaux lourde.

Parfois les grappiers sont, à deux reprises successives, passés sous des meules et tamisés; les poudres obtenues sont réincorporées dans la chaux initiale ; quant au résidu de cette double mouture, il est soumis à une nouvelle extinction, puis à une série de nouveaux broyages suivis de blutages à des toiles de plus en plus fines : le produit final de ces opérations assez complexes n'est autre que le ciment de grappiers.

18. Dispositions générales des usines à chaux. — En général, l'agencement le plus avantageux des diverses

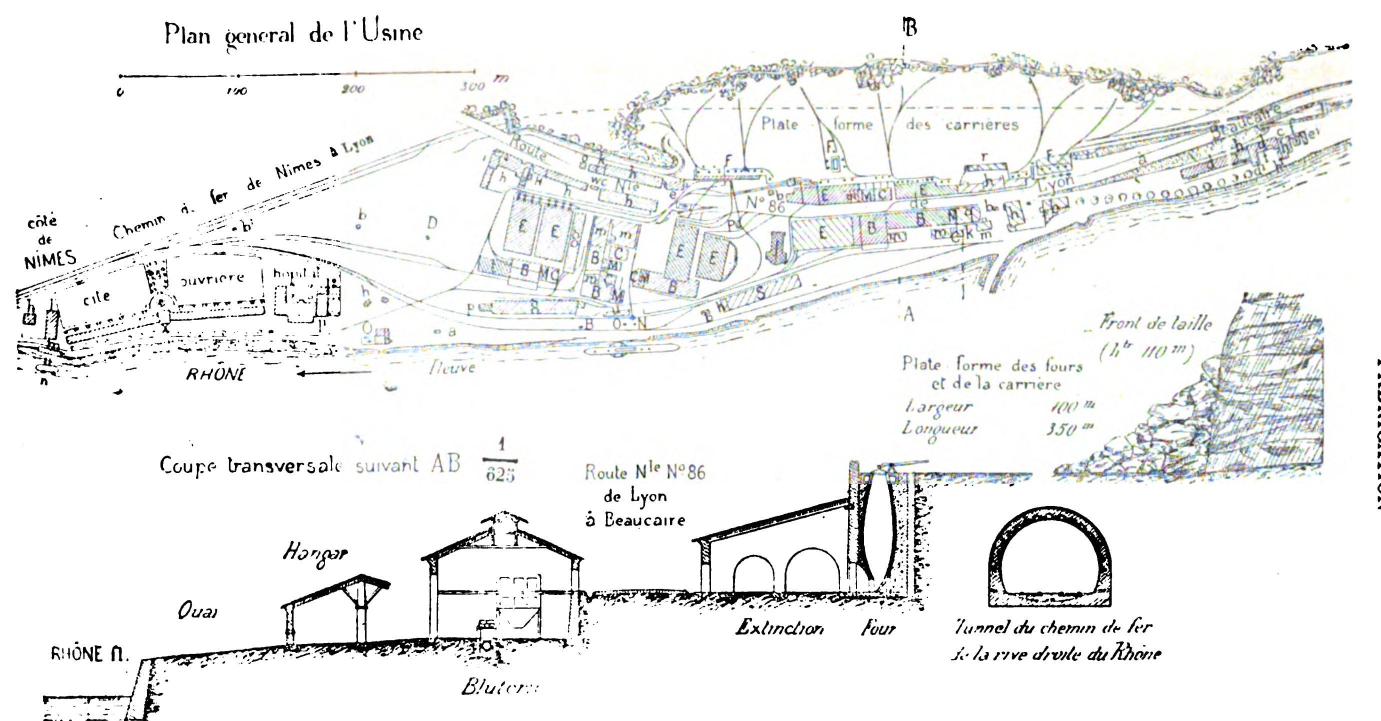


FIG. 44 et 45. — *Légende :* B, Bluterie. C, Chaudières. D, Bascules. E, Extincteurs. F, Fours. H, Menuiserie. M, Machines. N, Puits. O, Pompe. P, Plomberie. S, Sacherie.

a, Abattoirs. b, Bureaux. b¹, Bureaux de la Cie P.L.M. c, Cuisines. d, Dortoirs. d¹, Réfectoires. e, Ecuries. e¹ Communs. f, Caves. g, Halle à grappier. h, Logements. h¹ Abri. i, Boulangerie. k, Lavoir. l, Ecole de garçons. l¹, Ecole de filles. l² Asile. m, Magasins. n, Moulin à ciment. o, Pompe à incendie. p, Briqueterie. q, Forge. r Charronnage. t, Tonnellerie. u, Charbon. wc, Water-Closets. x, Cercle.

parties d'une usine est celui qui réalise le minimum de transport des matières et la meilleure utilisation des forces naturelles et, plus particulièrement, de la pesanteur.

A ce point de vue, on peut citer comme modèle la célèbre usine de Lafarge du Teil (Ardèche), représentée en plan et en coupe schématique par les figures 44 et 45 ci-dessus [1]. Située à flanc de coteau entre sa carrière et le Rhône, elle est constituée par une série de gradins que les matières descendent progressivement à mesure que la fabrication devient plus avancée, depuis la carrière jusqu'au chemin de fer et au quai d'embarquement sur le fleuve, en passant par les fours, les chambres d'extinction, la bluterie et les magasins.

On remarque d'ailleurs sur le plan l'importance des services annexes.

§ 2. — Fabrication des ciments de laitier

19. Premiers procédés. — Les premières tentatives faites en vue d'utiliser les laitiers de haut-fourneau à la confection de composés hydrauliques ont consisté à employer ces matières à la façon des pouzzolanes ordinaires, c'est-à-dire en formant avec elles et la chaux des mélanges dont on se servait pour maçonner. On cite notamment un composé obtenu en broyant, généralement à l'état humide, le laitier avec 15 parties de chaux et 15 parties d'oxyde de fer.

On a ensuite songé à ajouter au laitier les éléments chimiques nécessaires pour que la composition du mélange se rapprochât le plus possible de celle du portland, et à cuire le tout de la même manière que les roches calcaires ou les pâtes artificielles employées à la fabrication des ciments proprement dits. Tel est le principe du procédé Ransome, qui

(1) Pendant qu'on imprime cet ouvrage, nous apprenons que le plan ci-joint, emprunté à la première édition, a été modifié par suite de la création d'un nouveau groupe de fours, de quais couverts pour chargement, d'un nouvel hôpital et d'une nouvelle école de filles, ainsi que par suite de l'extension des magasins et des salles d'extinction.

Mais ces détails n'ont que peu d'intérêt pour le lecteur, qui ne cherchera ici qu'un exemple de dispositions générales.



consistait à cuire dans un four rotatif un mélange intime par parties égales de laitier et de craie broyés à l'état humide, puis séchés ; tel est aussi celui d'un produit obtenu par la cuisson d'un mélange de laitier, de carbonate de chaux et de beauxite, alumine hydratée naturelle.

Dans un ordre d'idées analogue, M. Farinaux a proposé de mettre à profit la chaleur sensible et latente du laitier, en faisant l'addition des matières dans la scorie encorefluide. Les résultats obtenus dans la pratique n'ont pas été satisfaisants.

La méthode actuelle consiste, comme on l'a déjà vu plus haut, à mélanger intimement à froid de la chaux éteinte et du laitier bien secs et amenés à une grande finesse. Ainsi M. Larsen broie 75 pour 100 de scories sèches avec 25 pour 100 de chaux éteinte dans une machine spéciale destinée à rendre la masse parfaitement homogène. Mais c'est à MM. Bosse et Wolters qu'est due la méthode le plus généralement suivie maintenant, et qui va être décrite ci-après.

Le ciment de laitier a d'ailleurs été l'objet d'assez nombreuses recherches de laboratoire, parmi les plus importantes desquelles il convient de citer celles de M. Tetmajer[1] et celles de M. Prost, ingénieur des Mines, dont le mémoire très complet[2] nous a fourni un certain nombre des renseignements qui vont suivre.

20. Choix du laitier. — Tous les laitiers sont loin de se prêter également à la fabrication du ciment. Pour qu'ils jouissent des propriétés pouzzolaniques qu'on leur demande, il est nécessaire que les éléments chimiques dont ils sont formés ne dépassent pas certaines proportions, et se trouvent en outre dans un état physique particulier.

Les éléments fondamentaux des laitiers étant la silice, l'alumine et la chaux, la pratique a montré que les proportions de ces corps devaient être telles que le laitier fût franchement basique. Toutefois cette condition, considérée comme nécessaire, n'est pas suffisante.

[1] Tetmajer, *Der Schlackenzement*. Berlin, 1887.
[2] Prost, *Note sur la Fabrication et les Propriétés des Ciments de laitier* (*Annales des Mines*, 1889).

M. Tetmajer admet que le pouvoir pouzzolanique croît en même temps que le rapport de la proportion de chaux à celle de silice, pourvu toutefois que la proportion de chaux ne soit pas telle qu'on ait un laitier fusant. Il juge, en outre, que les meilleurs résultats sont obtenus quand le rapport de l'alumine à la silice est compris entre 0,45 et 0,50, et conclut que les poids des trois éléments, chaux, silice et alumine doivent être sensiblement proportionnels aux nombres 46, 30 et 16.

A la suite d'expériences synthétiques, M. Prost croit pouvoir conclure « qu'un laitier est d'autant plus avantageux qu'il est à la fois plus riche en chaux et en alumine, conditions réalisées surtout dans les laitiers de moulage ».

M. Camerman[1] observe que, tant qu'on ne dépasse pas une certaine limite, certainement inférieure au nombre 2,66, la valeur des laitiers est presque exactement proportionnelle au rapport du poids de l'oxygène des bases (chaux et alumine) au poids d'oxygène de la silice.

Enfin, M. Le Châtelier pense que la meilleure composition doit se rapprocher de la formule

$$2SiO^2 + Al^2O^3 + 3CaO.$$

Pour ne citer que ces auteurs, on voit que l'on n'est pas encore fixé sur les proportions exactes qui correspondent aux meilleurs laitiers. Il est d'ailleurs probable que les éléments autres que les trois qui viennent d'être considérés jouent aussi un certain rôle. En particulier, on constate que la plupart des laitiers contiennent du soufre et du fer qui, par leur combinaison, donnent aux mortiers immergés une coloration verte caractéristique.

21. Granulation du laitier. — Pour qu'un laitier convienne à la fabrication du ciment, il est indispensable qu'il ait été amené par refroidissement brusque à l'état de sable friable, bien que cette opération ne modifie pour ainsi dire pas les proportions des divers corps simples dont il est composé.

On a même constaté que la qualité du laitier était d'autant

[1] *Les Ciments portland et les Ciments de laitier*. Gand, 1892

meilleure que la différence des températures par lesquelles la matière était passée dans un temps donné extrêmement court était plus considérable.

On explique quelquefois cette particularité par l'état plus spongieux du laitier obtenu, qui permettrait un contact plus intime des éléments.

Quant au fait principal, c'est-à-dire l'influence de la granulation, on n'est pas non plus bien fixé sur sa cause. M. Tetmajer et M. Camerman l'attribuent chacun de leur côté à une sorte de dissociation, au contact de l'eau, des composés initiaux en autres éléments plus capables de se combiner à la chaux. M. Le Châtelier pense, au contraire, que les laitiers granulés, restant vitreux, retiennent toute la chaleur de cristallisation, qui se transformerait en eux en une plus grande somme d'énergie chimique disponible. Cette explication a été d'ailleurs confirmée par M. Prost, à la suite d'observations micrographiques et d'essais calorimétriques.

En pratique, la granulation est obtenue par la projection d'une veine liquide de laitier à une très haute température soit dans un courant d'eau froide, soit dans une masse d'eau suffisamment abondante pour que l'échauffement produit soit faible. Le sable vitreux obtenu est puisé au moyen de godets perforés et, s'il y a lieu, débarrassé par criblage des gros morceaux insuffisamment granulés.

22. Séchage du laitier. — Les dispositifs employés pour débarrasser le sable de laitier de l'eau qu'il a entraînée varient suivant les usines. Tantôt ce sable est étalé sur une aire au-dessous de laquelle des gaz chauds circulent dans des conduits la parcourant dans toute son étendue ; tantôt il descend, sur des plans inclinés contrariés, autour d'un conduit central vertical traversé par ces gaz ; tantôt il est constamment retourné dans un cylindre chauffé par un foyer inférieur dont les flammes le traversent ensuite en sens inverse. Toutes les fois qu'on le peut, il est avantageux d'utiliser la chaleur perdue du haut-fourneau.

Dans certaines usines, on a songé à supprimer l'opération du séchage en mélangeant directement le laitier mouillé

avec de la chaux vive; mais le ciment ainsi fabriqué ne peut inspirer la même confiance que celui qu'on obtient avec du laitier séché et de la chaux bien éteinte, à cause des parcelles de chaux vive qu'il peut encore retenir.

23. Pulvérisation et blutage du laitier. — Avant d'être mélangé à la chaux pour former le ciment de laitier, le laitier granulé doit être amené à un état d'extrême division. Nous ne décrirons pas les nombreux appareils capables de produire ce résultat. Suivant les usines, on emploie soit des meules de moulin ordinaires horizontales, l'une gisante, l'autre courante, soit des meules roulantes verticales, soit des broyeurs à boulets de divers systèmes, etc., soit des combinaisons de plusieurs appareils différents, destinés les uns à commencer le broyage, les autres à le finir.

Le plus souvent, des appareils de tamisage leur sont adjoints et renvoient automatiquement dans le broyeur les grains insuffisamment pulvérisés. Dans les autres cas, les bluteries sont distinctes et ne diffèrent guère, en général, que par leur plus grande finesse, de celles qu'on emploie dans la fabrication des chaux et des ciments proprement dits.

24. Nature et proportion de la chaux. — A l'origine, on n'employait guère que des chaux grasses à la fabrication du ciment de laitier. Depuis quelque temps, certaines usines font usage de chaux plus ou moins hydrauliques. Les ciments obtenus passent pour avoir une prise plus rapide et être moins sujets au fendillement à l'air. Les résistances sont d'ailleurs sensiblement les mêmes.

En somme, l'influence de la nature de la chaux est encore fort incertaine.

De même, la proportion de chaux qu'il convient de mélanger au laitier varie suivant les compositions de ces deux matières, sans qu'on ait pu encore établir de règles générales, et ce n'est qu'à la suite de tâtonnements parfois assez longs que chaque usine arrive à fixer les meilleures proportions correspondant aux matériaux dont elle dispose.

En pratique, le poids de chaux varie généralement de 30 à 55 kilogrammes pour 100 kilogrammes de laitier.

25. Additions. — On a quelquefois recours, pour accélérer la prise et diminuer la tendance au fendillement, à l'addition dans le ciment de laitier de diverses matières pouzzolaniques, telles que les pouzzolanes naturelles, l'argile cuite, certains résidus de la fabrication des aluns, etc.

De même on peut, pour donner du glacé aux enduits, incorporer du carbonate de soude dans le ciment, dans le cours même de sa fabrication. Mais il est probable que, dans ce dernier cas, le produit obtenu doit être d'une conservation difficile en raison de l'hygroscopicité du sel employé et de sa réaction sur la chaux libre.

26. Mélange des matières. — Les matières, laitier, chaux et additions s'il y a lieu, amenées préalablement à l'état de poudres fines et bien sèches, sont pesées soigneusement et malaxées dans des appareils spéciaux de formes diverses, destinés à produire un premier mélange, puis envoyées dans des broyeurs où le mélange s'achève en même temps que les matières sont amenées à une finesse encore plus grande par une nouvelle trituration qui en rapproche les molécules.

Ces appareils, appelés homogéniseurs, sont parfois à marche continue. Mais, le plus souvent, ce sont des cylindres horizontaux tournant autour de leur axe et munis intérieurement de boulets de fonte.

Le mélange, introduit par une porte spéciale, est trituré pendant un temps donné, puis extrait par la même ouverture et remplacé par de nouvelles matières. Il ne reste plus alors qu'à l'ensacher, et il est prêt à être livré au commerce, sans qu'il soit nécessaire de le laisser préalablement reposer quelque temps en magasin.

§ 3. — Fabrication des ciments proprement dits

37. Matières premières. — La grande variété des matières capables de donner du ciment quand on les soumet à la cuisson soit pures, soit à l'état de mélanges

convenablement dosés, prouve que, tant que les éléments principaux se rencontrent dans des proportions comprises entre certaines limites, d'ailleurs assez écartées, le choix des matières premières n'a qu'une importance assez secondaire.

Pour la fabrication des ciments naturels, il est indispensable que les bancs exploités présentent une étendue assez considérable et soient homogènes. Dans le cas des ciments artificiels, cette condition doit encore être recherchée, quoique à un degré moindre, à cause des tâtonnements incessants qu'elle évite et des brusques variations qui pourraient se produire sans qu'on s'y attende et troubler toute la fabrication d'une usine.

Suivant la disposition du terrain, l'exploitation se fait tantôt en galeries, tantôt à ciel ouvert. Elle ne diffère en rien de celle des carrières ordinaires. Nous signalerons seulement l'emploi, à l'usine de la Porte de France, à Grenoble, d'un câble aérien automoteur, le long duquel les matières franchissent dans une benne une distance de 600 mètres [1].

Les roches destinées à être cuites à leur état naturel doivent présenter une certaine cohésion et être concassées en morceaux de 8 à 15 centimètres environ, de manière à être également accessibles en toutes leurs parties à l'action de la chaleur, sans pourtant intercepter le tirage du four.

La composition des roches soumises directement à la cuisson ou des mélanges employés à la fabrication des ciments artificiels varie d'ailleurs suivant la nature du ciment qu'on se propose d'obtenir. On a vu plus haut que, pour le ciment portland, la proportion d'argile était généralement comprise entre 19 et 25 pour 100 du poids du mélange sec. Un fort dosage en argile exige une cuisson moindre et donne, surtout quand on défourne très rapidement, un produit qui s'effrite spontanément en formant une poudre à peu près inerte. Une proportion un peu trop faible nécessite, au contraire, une forte cuisson et correspond

[1] Pour sa description, voir l'article de M. Gariel (*Annales des Ponts et Chaussées*, avril 1877).

à des roches très denses, dures à moudre, produisant un ciment dangereux par suite de l'excès de chaux vive non combinée qu'il contient généralement.

Enfin, il est avantageux, au point de vue de l'homogénéité des pâtes artificielles, de les composer par la réunion de matières premières dont l'une au moins se rapproche déjà le plus possible du dosage à obtenir pour le mélange.

28. Préparation des mélanges artificiels. — Quand on n'opère pas sur les matières brutes telles qu'on les extrait de la carrière, les mélanges peuvent être préparés de diverses manières :

1° Procédé par double cuisson. — La méthode la plus ancienne est celle qui a été employée pour la première fois par Vicat lors de la construction du pont de Souillac, puis par Aspdin pour la préparation de ses premiers ciments. Elle n'est plus guère appliquée aujourd'hui qu'à l'usine de Vif pour la fabrication du portland Vicat artificiel et consiste à préparer d'abord de la chaux grasse et à cuire un mélange intime et rigoureusement dosé de cette chaux éteinte et blutée et d'un calcaire argileux préalablement séché et pulvérisé [1].

La chaux est cuite dans des fours à chaux ordinaires établis dans le voisinage de la carrière. Après élimination des incuits, elle est transportée en morceaux à l'usine centrale où elle est éteinte par immersion, puis blutée. Les grappiers, soumis à une nouvelle extinction et à un second blutage, sont réincorporés, et le mélange est envoyé dans des silos et analysé.

Le calcaire, dont la teneur en argile est d'environ 40 pour 100, est soumis, près de la carrière d'où on l'extrait, à une forte dessiccation dans des fours à chaux à marche continue, puis réduit en menus morceaux par des concasseurs à mâchoires, pulvérisé entre des meules de pierre, bluté et envoyé dans des silos dits doseurs. Là, un dispositif

[1] Voir l'étude de M. Gobin sur la *Fabrication et les Propriétés des Ciments de l'Isère* (*Annales des Ponts et Chaussées*, juin 1889).

mécanique spécial prélève des échantillons, représentant la composition moyenne de la poudre, qu'on analyse et dont la teneur en argile permet de calculer le poids de chaux qu'il conviendra de mélanger à 100 kilogrammes de calcaire. Ces matières sont pesées simultanément et vidées dans un appareil où elles se mélangent, puis délayées avec de l'eau, de manière à former une pâte molle qu'on introduit dans des moules.

La prise se fait très rapidement et les briquettes, démoulées au bout de quelques minutes, n'ont plus qu'à être séchées à l'air avant la cuisson définitive.

2° PROCÉDÉS PAR VOIE HUMIDE. — Le principe de ces procédés consiste à délayer ensemble dans de l'eau les matières, craies, marnes, argiles, bourbes d'alluvion, qu'il s'agit de mélanger.

En général, l'opération s'effectue dans des bassins circulaires appelés délayeurs ou malaxeurs, dans lesquels des râteaux ou des herses, tournant autour d'un axe vertical, désagrègent les matières, tandis qu'un filet d'eau tombe dans le bassin et met en suspension les parties les plus ténues.

Cet appareil fonctionne d'une manière continue et n'a besoin d'être arrêté que de loin en loin pour l'extraction des pierres et des parties trop dures qui n'ont pu être délayées.

Le calcaire et l'argile, dont on connaît d'avance la composition, sont introduits à la brouette en proportions déterminées de telle sorte que le mélange présente une composition aussi rapprochée que possible de celle qu'on recherche.

Certains fabricants étrangers, confiants dans la constance de leurs bancs et dans le coup d'œil du contremaître préposé aux délayeurs, considèrent la pâte qui sort de ceux-ci comme bien dosée et l'emploient sans autre vérification qu'un essai mécanique sommaire du ciment terminé. D'autres, un peu plus scrupuleux, font, à des intervalles plus ou moins rapprochés, l'analyse chimique de la pâte crue sortant des délayeurs, et s'inspirent des résultats trouvés pour modifier, s'il y a lieu, les proportions des matières introduites ultérieurement, mais sans disposer de moyens qui permettent de corriger la composition des mélanges déjà fabriqués.

Dans la région de Boulogne, où le procédé par voie humide

est presque exclusivement employé, les matières sont délayées avec 100 à 150 pour 100 de leur poids d'eau, de manière à former une sorte de lait épais.

Autour du bassin malaxeur (*fig.* 46) sont tendus, à sa partie supérieure, des toiles métalliques T où le flot vient se tamiser, laissant échapper les parties fines, tandis que les morceaux insuffisamment désagrégés retombent dans le délayeur.

De là, le lait s'écoule lentement dans des conduits longs et plats où il dépose les grains trop gros qu'il peut encore contenir, et va se déverser dans de grands réservoirs, appelés bassins doseurs (*fig.* 47 et 48), où il est agité par des palettes. Avant qu'un bassin soit complètement rempli, on y prélève des échantillons qu'on analyse rapidement, de manière à pouvoir corriger, s'il y a lieu, la composition de la matière contenue, en ajoutant, suivant le besoin, de la pâte plus calcaire ou plus argileuse. La pâte n'est livrée à la fabrication qu'après que l'analyse indique une composition satisfaisante. Par surcroît de précaution, on réunit souvent dans une même citerne, avant de les envoyer aux séchoirs, les pâtes dosées provenant de plusieurs bassins.

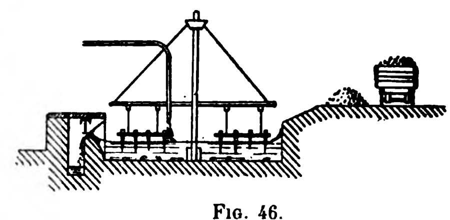


Fig. 46.

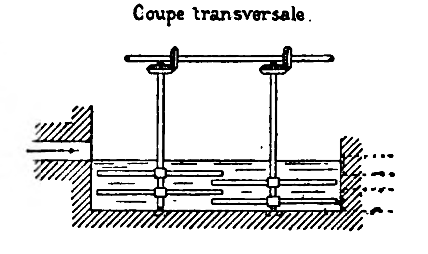


Fig. 47 et 48.

Avant d'être soumise à la cuisson, la pâte artificielle doit être séchée, résultat qui s'obtient de différentes manières.

1° La matière sortant des bassins doseurs, où on lui a déjà enlevé un peu d'eau par décantation, est exposée à l'air libre dans de larges bassins à sol perméable, sur une épaisseur dépassant rarement 1 mètre, où elle perd, à la fois par décantation, par infiltration et par évaporation, une partie de son eau ; on l'y laisse, pendant une durée variable suivant la saison et les besoins de l'usine et qui atteint généralement trois à quatre mois, jusqu'à ce qu'elle ait une consistance telle qu'on puisse la prendre à la pelle. Elle retient alors environ 25 à 30 pour 100 d'eau. On la transporte sur des séchoirs spéciaux, aires planes chauffées en dessous par des foyers servant en même temps à la fabrication du coke, où elle achève de se dessécher.

2° Dans un grand nombre d'usines, les fours à ciment sont disposés de manière à utiliser au séchage de la pâte les gaz chauds résultant de la combustion. La pâte est alors envoyée directement sur les séchoirs des fours, où elle doit perdre toute son eau pendant la durée d'une cuisson, de manière à servir pour la fournée suivante.

Ces fours, dits « fours anglais », seront décrits un peu plus loin.

La méthode de délayage des matières à grande eau, qui vient d'être décrite, a l'avantage d'assurer un mélange parfait facile à corriger s'il n'a pas du premier coup la composition voulue, et ne contenant pas de grains calcaires de dimensions appréciables, qui constituent toujours un grave danger par suite des noyaux de chaux vive non combinée qu'ils donnent par la cuisson. Par contre, la nécessité d'évaporer la grande quantité d'eau introduite entraîne une dépense supplémentaire de combustible ou de main-d'œuvre, ou exige des installations encombrantes et de grandes étendues de terrain.

Un autre procédé par voie humide, nommé procédé Goreham, du nom de son inventeur, et qui n'est guère appliqué qu'à l'Étranger, surtout en Angleterre, consiste à employer pour le délayage une quantité d'eau moins abondante, de manière à former une sorte de bouillie avec les matières premières qu'il s'agit de mélanger.

Les délayeurs sont les mêmes, sauf que la toile métallique est remplacée par une simple grille destinée à arrêter seulement les plus gros morceaux; la pâte qui en sort est envoyée sous des meules qui la broient et achèvent de la mélanger. Vu la consistance déjà assez ferme de la pâte, qui ne contient guère qu'environ 40 pour 100 de son poids d'eau, il n'y a pas lieu de l'exposer dans des bassins d'évaporation à l'air libre. Elle est envoyée immédiatement sur des séchoirs chauffés soit par des foyers spéciaux, soit par la chaleur perdue des fours.

On remarque que ce procédé ne permet pas de corriger une pâte reconnue mal dosée, et, en outre, on peut se demander si des grains n'échappent pas aux meules. Aussi a-t-il été fréquemment l'objet de critiques assez vives.

3° Procédé par voie sèche [1]. — Le procédé humide, qui s'impose quand les matières à mélanger contiennent des proportions d'impuretés, telles que du silex ou du sable, assez importantes pour qu'il soit nécessaire de les éliminer, se trouve au contraire en défaut quand les calcaires dont on dispose sont trop durs pour pouvoir être délayés.

On a cherché à supprimer la plupart des inconvénients qui s'y rattachent en broyant les matières à sec et mélangeant en proportions convenables les poudres plus ou moins riches en argile.

Dans ce but, on commence par sécher le calcaire et l'argile soit sur des fours à coke, soit dans des sortes de tunnels traversés dans un sens par un courant d'air chaud et dans l'autre par les wagonnets contenant les matières, soit dans des cylindres tournants à double paroi, munis intérieurement d'ailettes héliçoïdales et traversés également par des gaz chauds, soit dans des fours à chaux ordinaires, sur des plans inclinés, ou dans des tours séchantes de divers systèmes.

Après une pulvérisation sommaire, les matières sont analysées séparément et mélangées par poids calculés d'après

[1] Voir les articles publiés sur ce sujet par M. Engelhart dans l'*Engineering* (1, 8 et 22 juin 1894) et reproduits dans *le Moniteur scientifique* du Dr Quesneville (juillet 1895).



les résultats des analyses, puis passées sous des meules où elles sont amenées ensemble à une grande finesse.

La farine obtenue est ensuite légèrement imbibée d'eau, de manière à former une pâte plus ou moins sèche qu'on transforme en briquettes, soit en la comprimant dans des moules, soit en la passant dans une filière à section rectangulaire et débitant au fil des tranches parallèles dans le barreau qui sort de l'appareil.

Il ne reste plus, avant l'enfournement, qu'à sécher ces briquettes, ce qu'on obtient le plus souvent en les rangeant sur des étagères dans des chambres où l'on peut faire circuler à volonté, par l'ouverture de registres, des gaz chauds produits par un foyer spécial ou sortant des fours de cuisson. Parfois encore on utilise à cet effet le rayonnement du four, dont on peut alors diminuer l'épaisseur des parois.

Les avantages du mélange à sec sont l'économie réalisée sur le combustible destiné au séchage des matières, le peu d'espace nécessaire et la suppression des à-coups que l'alternative des saisons peut occasionner dans la préparation des pâtes humides. En outre, la pâte obtenue se présente en blocs de formes régulières convenant particulièrement à la cuisson au four Hoffmann.

Aussi ce procédé est-il de plus en plus employé. Ses partisans prétendent d'ailleurs qu'il réalise un mélange plus intime et plus homogène des matières premières, et fournit par suite des produits de meilleure qualité que la méthode par voie humide. Cette assertion, peut-être juste en ce qui concerne le procédé Goreham, nous paraît fort discutable quand on compare le mélange à sec au délayage à grande eau tel qu'il est pratiqué dans le Boulonnais.

4° Procédé mixte. — Dans quelques usines, une partie des pâtes est préparée par voie humide et le reste par voie sèche, puis la poudre et la matière molle sont mélangées ensemble de manière à former une masse assez consistante se prêtant à la fabrication des briquettes.

On procède de même dans certaines usines travaillant exclusivement par le procédé humide, mais ayant besoin,

pour l'alimentation de fours Hoffmann, de briquettes de forme régulière.

La pâte molle est alors mélangée de débris de pâte sèche provenant d'autres parties de l'usine, ce qui lui donne la consistance ferme nécessaire pour le moulage ou le tréfilage.

Dans les deux cas, les briquettes sont séchées comme celles obtenues par le procédé à sec. En particulier, les fours Hoffmann sont généralement recouverts d'une toiture en charpente, sous laquelle sont installées des étagères où les briquettes de pâte peuvent être séchées par le rayonnement du four. (Voir plus loin la figure 53.)

29. Cuisson. — On emploie pour la cuisson des ciments une telle variété de fours qu'il est difficile de trouver deux usines de quelque importance dans lesquelles les dispositions soient identiques. Souvent même, dans une seule usine, on rencontre des fours différant entre eux par leur forme, leur capacité ou leur mode de fonctionnement.

Malgré cet état de choses, dû aux perfectionnements que chaque fabricant cherche continuellement à apporter à cet organe fondamental, les divers fours peuvent être ramenés à un petit nombre de types; nous nous bornerons à décrire sommairement les principaux.

1° Fours ordinaires a courte flamme. — Le type le plus généralement employé est un four à courte flamme à cuve verticale, analogue à ceux qui servent à la fabrication de la chaux. La capacité de ces fours, extrêmement variable, atteint parfois jusqu'à 150 mètres cubes, et la production maximum par fournée peut s'élever à 100 tonnes environ.

La cuve a la forme tantôt d'un tronc de cône renversé surmonté d'une partie cylindrique, tantôt de deux troncs de cône accolés par leur plus grande base avec ou sans raccordement cylindrique, tantôt d'une surface de révolution ovoïde à génératrice courbe.

La chemise doit être appropriée au degré de cuisson qu'on se propose d'atteindre. Pour la fabrication des ciments rapides, par exemple, qui n'exigent pas une très haute tem-

pérature, on peut se contenter de briques plus ou moins réfractaires. Au contraire, les fours à ciment portland, où la température atteint aux environs de 2.000°, doivent avoir des parois très résistantes ; on les garnit soit de briques recouvertes d'un enduit réfractaire d'une composition analogue à celle de la pâte à ciment, soit de moellons de grès, soit de pierres artificielles en ciment aggloméré.

La forme de la cheminée dépend aussi du degré de cuisson à obtenir.

Pour les ciments rapides, il n'est pas nécessaire d'avoir une cheminée et le four est généralement analogue aux fours à chaux. Si l'on veut une cuisson un peu plus forte, on peut recouvrir le gueulard d'une sorte de couvercle en tôle, qui permet de régler le tirage plus facilement et met le contenu du four à l'abri des intempéries ; des carneaux établis dans la paroi, à la partie supérieure de la cuve, laissent, quand le couvercle est fermé, un passage aux gaz, qui sont alors aspirés par une cheminée commune à plusieurs fours.

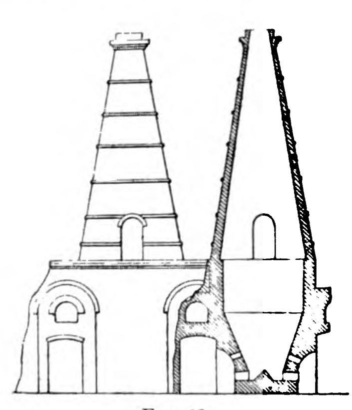


Fig. 49.

Pour la fabrication du portland, on surmonte chaque four d'un dôme ou d'une cheminée plus ou moins haute destinés à concentrer la chaleur et à activer le tirage. La forme est tantôt celle d'une calotte aplatie surmontée d'une petite cheminée cylindrique, tantôt celle d'une ruche d'abeilles, tantôt celle d'un tronc de cône allongé, pouvant atteindre jusqu'à une hauteur de 15 mètres (*fig.* 49). Aussi ces fours sont-ils souvent désignés sous le nom de fours à dôme. Une ou deux portes, pratiquées dans le dôme ou dans la cheminée, laissent passage aux hommes chargés de l'enfournement et sont, pendant la cuisson, bouchées au moyen de plaques de tôle lutées.

La cuisson du ciment rapide peut être conduite d'une

manière continue comme celle de la chaux ; les morceaux n'éprouvent en effet aucun commencement de fusion, et leur masse coule facilement. Tous les matins, par exemple, on tire par le bas du four une quantité de ciment déterminée, et on remet par le gueulard des pierres et du combustible.

Pour les ciments lents, et plus particulièrement pour les portlands, ce mode de procéder présente de très sérieuses difficultés. Par suite de la haute température atteinte, les morceaux se ramollissent à leur surface, adhèrent à la chemise du four ou se soudent les uns aux autres en formant souvent d'énormes masses qui ne peuvent descendre régulièrement. On a donc été obligé, jusqu'à l'invention assez récente de fours spéciaux, d'opérer par fournées consécutives, et un très grand nombre d'usines appliquent encore cette méthode.

Le combustible et la pâte sont introduits et étalés par couches alternatives en proportions soigneusement mesurées et variables suivant les parties du four. Pour une même quantité de pâte, le poids de charbon doit aller en diminuant quand on s'élève du bas du four jusqu'à sa partie supérieure. La pâte doit être en morceaux bien distincts et suffisamment gros pour ne pas obstruer le tirage ; il est avantageux de la répartir uniformément dans chaque couche. Le combustible est tantôt du coke, tantôt du charbon maigre. Parfois, on emploie du coke dans la partie inférieure du four et du charbon dans le reste de la cuve. La composition du charbon n'est d'ailleurs pas indifférente, à cause des gaz sulfurés qu'il peut dégager et du mélange qui s'opère nécessairement entre ses cendres et le ciment.

L'enfournement est continué non seulement dans toute la hauteur de la cuve, mais même jusqu'à hauteur d'homme, à la naissance de la cheminée. Puis on ferme les portes, on allume quelques fagots au pied du four, et le feu se propage de proche en proche.

La durée de la cuisson varie suivant la saison, la force et la direction du vent, la capacité du four, la proportion et la nature du combustible. En général, elle est comprise entre quatre et douze jours. A mesure que le charbon se consume et que l'acide carbonique du calcaire est expulsé, les

matières se tassent et augmentent de densité, ce qui produit un abaissement du niveau supérieur de la masse.

Dans un grand nombre d'usines, quand le volume s'est suffisamment réduit, on procède à un rechargement, qui consiste à jeter à la pelle par les ouvertures des cheminées, qu'on rouvre pour cela, de nouvelles pâtes crues et un peu de combustible au-dessus de la masse en ignition. On referme les portes, on laisse la cuisson s'achever et, quand on juge les matières suffisamment refroidies, on commence à les tirer par le fond du four après avoir enlevé les barreaux de la grille. Des ouvertures spéciales, murées pendant la cuisson, permettent d'introduire des ringards pour désagréger les agglomérations trop volumineuses de roches cuites.

Ces fours sont relativement peu coûteux à établir et assez faciles à diriger. Par contre, leur allure intermittente est la cause d'importantes déperditions de chaleur et de dégradations assez rapides. En outre, appliqués à la cuisson des ciments artificiels, ils exigent des pâtes complètement séchées au préalable.

2° Fours intermittents a séchoirs horizontaux. — Pour remédier à ce dernier inconvénient, on a songé à disposer les fours de telle sorte que la chaleur perdue servît à sécher les pâtes destinées à les alimenter. Ce perfectionnement, imaginé et d'abord appliqué en Angleterre, a fait donner aux fours ainsi modifiés le nom de fours anglais.

La cuve est la même que celle des fours à dôme, mais les gaz, au lieu de s'échapper verticalement par un orifice situé dans le même axe, sont aspirés par une haute cheminée généralement commune à plusieurs fours, à travers de longues chambres voûtées horizontales de même largeur que la cuve.

Suivant les systèmes, la pâte molle est coulée soit dans ces chambres, où sa surface supérieure est léchée par les gaz, soit sur les tympans des voûtes ou sur des dalles minces les recouvrant, de manière à être chauffée par dessous. Souvent on combine les deux dispositions, de sorte qu'on sèche à la fois plusieurs couches de pâte (*fig.* 50). Parfois aussi la cheminée se trouve du côté du four, ce qui

fait faire aux gaz un double trajet dans des conduits superposés et permet d'utiliser plus complètement la chaleur restante. Enfin, on a quelquefois adapté latéralement de petits foyers additionnels destinés à activer le tirage ou à achever la combustion des gaz dégagés.

Les principaux types de séchoirs sont dus à MM. Johnson, Famchon, de Michele, Michaëlis, White, etc.

L'enfournement et la marche du four sont sensiblement les mêmes que dans le cas des fours ordinaires, et les rechargements se font par une ouverture pratiquée dans la paroi, à la partie supérieure de la cuve.

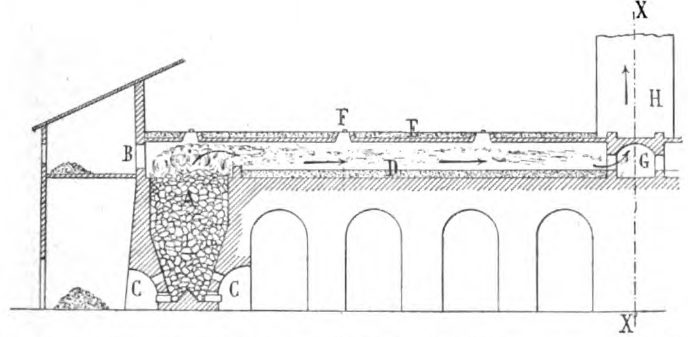


Fig. 50. — *Légende :* A, Cuve. — B, Porte de chargement. — C, Défournement. — D, Pâte du séchoir inférieur. — E, Pâte du séchoir supérieur. — F, Trou d'accès sous la voûte. — G, Carneau collecteur. — H, Cheminée centrale. — XX, Plan de symétrie.

Malgré leur principe plus rationnel, ces fours sont, en général, d'un rendement à peu près équivalent aux fours à dôme, car l'économie de main-d'œuvre qu'ils réalisent est compensée par des frais d'entretien plus importants et une plus forte consommation de combustible, par suite du volume considérable des maçonneries et de la pâte qu'il faut échauffer à chaque fournée.

3° Fours coulants a ciment portland[1]. — Nous avons dit que la principale difficulté de la cuisson continue à haute

[1] On trouvera les croquis de la plupart des fours mentionnés ci-dessous, de même que d'un certain nombre d'appareils de broyage et de tamisage dont il sera question plus loin, dans une note de M. Candlot publiée au *Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie nationale*, n° de Décembre 1895.

température provenait de l'adhérence des morceaux ramollis par la chaleur à la chemise du four et aux morceaux voisins.

On a songé à y remédier en donnant aux parois de la cuve une épaisseur assez faible pour que, par suite du rayonnement extérieur, la température y fût moindre qu'au centre (four Hauenschied), ou encore en faisant usage de morceaux de pâte en forme de boulets arrondis (four Hauenschied et four Brentano), de manière à diminuer le plus possible leurs points de contact entre eux et avec la chemise et à laisser aux gaz de la combustion un dégagement toujours constant. Presque toujours on a réduit à une très faible capacité la région du four, appelée alors creuset, où la cuisson devait être le plus intense, en ménageant, en différents points de la cuve, des regards permettant l'introduction de barres de fer pour désagréger au besoin les agglomérations trop volumineuses qui pourraient se produire. Enfin, on a généralement raccordé le creuset à la partie inférieure de la cuve par un évasement plus ou moins prononcé, destiné à faciliter l'écoulement des matières cuites.

En raison de leur forme et de leur mode de fonctionnement, ces fours peuvent être considérés, pour la plupart, comme composés de trois régions distinctes superposées soit dans le même axe (four Schofer, four Brentano), soit autrement (four Dietzsch, fours du Pasquier).

A l'étage supérieur, les morceaux de pâte, disposés autant que possible de manière à laisser un passage facile aux gaz sortis du creuset, achèvent de se dessécher et subissent, au contact de ces gaz dont ils doivent absorber toute la chaleur, un commencement de cuisson caractérisé par le départ de l'acide carbonique du calcaire. L'étage suivant comprend la chambre de mélange et le creuset. La matière déjà rouge y arrive par son propre poids ou y est amenée par des moyens mécaniques, et le charbon est introduit en même temps par des orifices spéciaux. La combustion s'opère et atteint dans le creuset son maximum d'intensité. Puis, les matières cuites descendent dans une troisième zone, située directement au-dessous de la seconde, où elles se refroidissent lentement en cédant toute leur chaleur à l'air aspiré par la grille

formant le fond du four, qui arrive ainsi déjà chaud dans la chambre de combustion, tandis que le ciment cuit est extrait froid par cette grille.

Ces fours sont surtout employés à l'étranger, où le four Dietzsch notamment est d'un usage très répandu. La figure 51 ci-contre représente deux fours Dietzsch accolés, comme on les construit généralement. La pâte est introduite par l'ouverture B, au pied de la cheminée A ; en sortant du réchauffoir C, elle prend, sur le palier D, son talus naturel, et est amenée, à mesure des besoins, dans le creuset H au moyen de ringards introduits par la porte G. C'est aussi par cette porte que le charbon, en morceaux très menus, est introduit à l'aide d'une sorte de cuiller servant en même temps à le mesurer. Les regards E permettent d'activer la descente de la pâte à l'aide de ringards, et les regards F et J de briser de même les enrochements formés par le collage des matières cuites. La durée pendant laquelle le ciment est exposé au plein feu est d'environ deux heures. Le refroidissement se produit dans la chambre K, au contact de l'air entrant par la grille L.

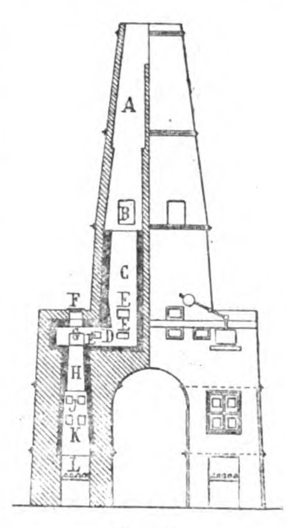


Fig. 51.

Ce four séduit par sa forme ramassée et son fonctionnement rationnel. Mais il est d'un maniement assez délicat et demande à être dirigé par un ouvrier expérimenté.

En France, plusieurs usines emploient, depuis quelques années, à la cuisson du ciment portland, des fours coulants permettant de sécher les pâtes molles à la manière des fours anglais. L'un d'eux, inventé par M. Bauchère, ingénieur directeur de la Société des Ciments français de Boulogne et de Desvres, et breveté en 1894 par cette Société, repose sur les principes suivants (*fig.* 52) :

La cuve A, de forme cylindrique, se termine à sa partie

supérieure par une ouverture conique B, destinée à l'introduction de la pâte sèche et du combustible, et dont la forme évasée permet aux morceaux de calcaire d'englober le charbon pendant la descente, en n'en laissant le long des parois du four que juste assez pour la cuisson.

Les gaz de la combustion, aspirés par une cheminée à travers le conduit C situé sous les séchoirs à pâte, sont pris par deux séries de carneaux à la partie évasée D du cône de chargement et au pourtour E de l'orifice supérieur du four. Ce dernier passage est fermé automatiquement par des registres F, chaque fois qu'on soulève le couvercle H pour introduire des matières, et le chargement s'effectue sans dégagement de gaz par le gueulard ni arrêt ou accélération du tirage du four.

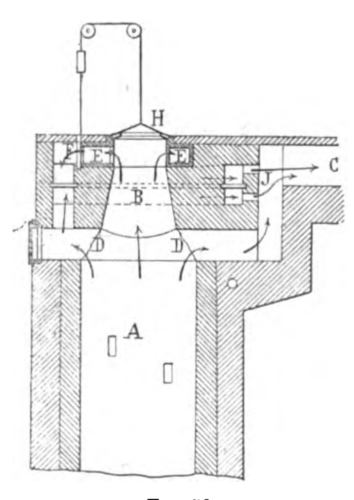


Fig. 52.

Les carneaux ont une disposition telle que les gaz arrivent sans interruption en J à l'origine du séchoir à une température constante et s'y brûlent au contact d'air pris à l'extérieur et réchauffé, conditions nécessaires pour obtenir une combustion complète du gaz et maintenir dans le four une dépression invariable permettant de cuire régulièrement.

Enfin, une injection continue de minces filets de vapeur d'eau sous la grille du four provoque la dislocation automatique des matières cuites, par suite de l'extinction de la chaux vive qui peut rester dans le ciment en roches.

4° Four annulaire Hoffmann. — Un grand nombre d'usines ont adopté, pour la cuisson du ciment portland, le four Hoffmann, employé fréquemment pour celle des briques.

Ce four (*fig.* 53 et 54) se compose d'une série de chambres voûtées, juxtaposées de manière à former un anneau plus ou

moins allongé et dont chacune peut être mise à volonté en

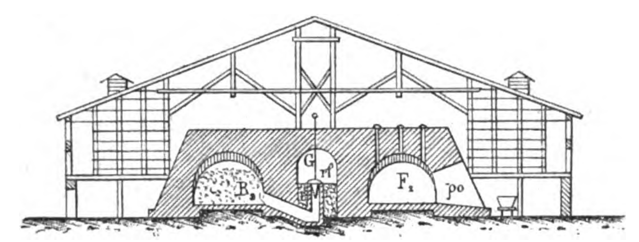


Fig. 53. — Coupe verticale suivant XX'[1].

Moitié supérieure de la figure :

Four vu du dessus après enlevage de la charpente.

—

Moitié inférieure de la figure :

Coupe horizontale au ras du sol.

Légende

—

A_1, A_2, A_3, Chambres en vidange.
B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, Chambres contenant du ciment cuit, plus ou moins refroidi.
C, Chambre où la cuisson est le plus intense.
D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, Chambres contenant des briquettes plus ou moins chaudes non encore cuites.
E, Chambre en chargement.
F_1, F_2, F_3, Chambres vides.
G, Carneau collecteur.
H, Cheminée.
J, Cloison en papier.
po, portes ouvertes.
pf, portes fermées.
ro, registres ouverts.
rf, registres fermés.

Fig. 54.

communication avec la chambre précédente, avec la chambre

[1] C'est par erreur que la figure présente une marche à la porte du four.

suivante, avec l'extérieur et enfin avec une cheminée centrale.

La pâte est moulée en briques parallélipipédiques que l'on empile, après séchage, de manière à diriger les gaz chauds en les faisant circuler également dans les diverses parties de chaque chambre pour produire une cuisson bien uniforme. Des regards pratiqués dans le plafond, et au-dessous desquels on réserve des espaces vides entre les piles de briques, servent à l'introduction du charbon, puis à un rechargement à l'aide de menus morceaux de pâte. Ils sont munis de couvercles destinés à empêcher des rentrées d'air trop abondantes.

Le principe consiste à cuire successivement les matières empilées dans les diverses chambres, de telle sorte que le feu fasse continuellement le tour du four, et à récupérer toute la chaleur non utilisée à la cuisson du ciment, en transférant celle qui reste dans les roches cuites à l'air destiné à alimenter la combustion, et celle des gaz formés aux pâtes non encore cuites.

A cet effet, la contenance et la disposition des divers compartiments à un moment donné étant telles que l'indique la figure 54, l'air, aspiré par les registres ouverts *ro* à travers toute la série des chambres occupées, entre dans le four par les portes *po*, refroidit les roches cuites contenues dans les compartiments A_1 à B_5 et arrive brûlant dans la chambre de combustion C où le charbon est introduit par les trous de la voûte. Les gaz chauds, continuant leur chemin, achèvent de se brûler avec de l'air introduit spécialement par les trous à charbon des compartiments suivants, commencent à cuire les pâtes de D_1, échauffent progressivement celles des compartiments D_2 à D_5 et s'échappent refroidis par le carneau G et la cheminée centrale H.

Quand, après la durée correspondant à la cuisson d'un compartiment, la chambre E est remplie de briques de pâte, on la sépare de la chambre F_1 par une feuille de papier et, déchirant la cloison J, on introduit la chambre E dans le circuit, en faisant toutes les manœuvres de registres et de portes nécessaires pour que le courant progresse d'une chambre sur toute l'étendue du four, la disposition générale restant semblable. En même temps, on introduit du char-

bon en D_1, on commence à tirer le ciment cuit de la chambre B_1, et ainsi de suite.

Ce four consomme peu de combustible, mais exige, pour la préparation et l'empilage des briques, une main-d'œuvre assez compliquée. Il demande à être conduit avec beaucoup de soin et convient bien à une fabrication continue et uniforme. Mais en cas d'à-coups, ou s'il a besoin de grosses réparations, son arrêt présente de très graves inconvénients. Enfin la difficulté de faire circuler également les gaz chauds dans toute la masse est souvent la cause d'une production d'incuits exagérée.

5° Four rotatif. — M. Ransome a imaginé de faire passer d'une manière continue la pâte sèche réduite en poudre dans un cylindre de fer légèrement incliné revêtu intérieurement de briques réfractaires et animé d'un mouvement de rotation autour de son axe. A la partie inférieure du cylindre aboutit un tuyau communiquant avec un gazogène. La combustion du gaz grille le ciment et donne une matière spongieuse facile à moudre.

Ce système, appliqué d'abord en Angleterre, puis abandonné, a été repris en Amérique et perfectionné par l'emploi du pétrole comme source de chaleur. Le cylindre mesure environ $1^m,80$ de diamètre et 13 mètres de longueur; sa vitesse de rotation, facilement réglable, varie de 1 à 3 tours par minute. C'est en modifiant cette vitesse et, par suite, la durée du séjour des matières dans le cylindre, qu'on arrive à obtenir le degré de cuisson que l'on désire. Les roches cuites obtenues ont à peu près la grosseur d'une noix. Les gaz encore chauds qui s'échappent par l'extrémité supérieure du cylindre sont recueillis et utilisés au séchage de la pâte crue.

Il nous a été rapporté que le fonctionnement de ce four laissait à désirer et devenait d'ailleurs de plus en plus onéreux par suite de l'enchérissement des pétroles.

30. Défournement et triage. — Quel que soit le mode de cuisson adopté, il importe que les matières refroi-

dissent lentement avant d'être extraites du four. Autrement elles risqueraient, surtout dans le cas de calcaires relativement riches en argile cuits à la température de formation du portland, de se réduire spontanément en une poussière sinon tout à fait inerte, au moins jouissant de propriétés hydrauliques bien moins énergiques que le ciment.

Toutes les parties du four ne pouvant être portées à une température identique, on rencontre au défournement des morceaux plus ou moins cuits. On comprend généralement sous le nom d'incuits tous les morceaux jaunes (à peine décarbonatés) ou gris (cuisson un peu plus forte), et on considère comme bien cuites des roches noires ou d'un vert très foncé, lourdes, dures et bien homogènes, qui ont subi un commencement de ramollissement. On appelle souvent surcuits des morceaux scoriliés ou vitreux qui paraissent provenir, pour la plupart, du combustible ou des parois du four.

Outre ces morceaux, se présentent des poussières de couleurs et d'aspects variés, les unes jaunes, qui ne sont autres que des débris de pâte non cuite, les autres gris bleu, mélanges de cendres et de matières plus ou moins actives résultant à la fois de la cuisson de petits grains de pâte et de la désagrégation de roches cuites.

Ces divers éléments ont évidemment des propriétés fort différentes, et l'art du chaufournier consiste à réduire au minimum la production de ceux qui sont inertes ou nuisibles. En tout cas, un triage est nécessaire, et la qualité du ciment dépend en grande partie du soin avec lequel cette opération a été conduite.

Les incuits non décarbonatés sont inertes; en général, on les met de côté pour les soumettre à une nouvelle cuisson.

Les morceaux de pâte dont l'acide carbonique a été chassé sans que toutefois la température ait été suffisante pour les transformer complètement en ciment, contiennent une proportion plus ou moins forte de chaux vive qui les rend très dangereux; ils doivent être aussi repassés aux fours. Dans certaines usines, on utilise les plus cuits d'entre eux à la fabrication de produits de seconde qualité.

Les poussières jaunes sont à rejeter au même titre que les incuits.

Les surcuits sont inertes; leur introduction dans le ciment ne présente aucun danger, mais diminue son énergie.

Quant aux poussières grises, elles n'ont par elles-mêmes que peu d'affinité pour l'eau et, mélangées en proportion trop considérable aux roches bien cuites, affaibliraient la résistance du ciment; par contre, employées en petite quantité, elles paraissent jouer dans une certaine mesure le rôle de pouzzolanes et neutraliser en partie les effets pernicieux de la chaux libre que le ciment peut encore contenir. On les mélange aux bonnes roches en proportions variables suivant les usines. Elles ont d'ailleurs une plus forte teneur en silice que le ciment proprement dit, ce qui explique la différence de composition chimique qu'on constate toujours entre le ciment moulu tel qu'il est livré au commerce et les roches pures prélevées au pied des fours.

Quelquefois, pour accélérer l'extinction de la chaux libre contenue dans les roches, on expose celles-ci un certain temps à l'air avant de les moudre, ou même on les arrose. A ce point de vue, l'emploi de la vapeur d'eau, déjà signalé à propos du four Bauchère, doit être particulièrement efficace. Il convient toutefois, quel que soit le procédé adopté, de ne pas dépasser le but à atteindre, et de n'employer l'eau liquide ou gazeuse qu'avec modération.

31. Pulvérisation. — La plupart des appareils en usage exigent que le ciment soit déjà réduit en menus morceaux. A cet effet, on emploie des broyeurs spéciaux, dont l'un des types les plus répandus est constitué par deux puissantes mâchoires cannelées, à peu près verticales, l'une fixe et l'autre mobile, entre lesquelles on jette à la pelle la matière triée venant des fours. Parfois encore on se sert, dans le même but, de paires de cylindres lisses ou cannelés, qu'on peut superposer en plusieurs étages de manière à faire passer successivement les matières à moudre entre des cylindres de plus en plus serrés. D'autres appareils, analogues aux moulins à café employés dans les ménages, se composent

essentiellement d'une noix cannelée ou lisse se mouvant dans une coquille de forme appropriée, où les matières, accumulées dans une trémie, s'engagent sous leur propre poids.

Le ciment, réduit en morceaux dont les plus gros ont à peu près la dimension d'une noix, est ensuite envoyé dans les appareils de mouture proprement dits.

Le plus souvent, ce sont des meules en pierre horizontales analogues à celles qui servent à la mouture du blé, l'une dormante, l'autre courante, la première généralement au-dessous de l'autre. Malgré l'entretien continuel qu'elles exigent par suite de la nécessité du rhabillage, ces meules paraissent être encore un des appareils les plus avantageux pour la réduction à l'état de poudre impalpable de matières aussi dures que le portland.

Un autre mode de broyage consiste à écraser la matière sous des meules ou des meuletons plus ou moins verticaux, roulant sur un plateau horizontal.

Tantôt le plateau est fixe et les meules, dont le nombre varie suivant les systèmes, se déplacent autour d'un même axe central tout en tournant sur elles-mêmes par suite de leur frottement contre le ciment. Tels sont, notamment, les broyeurs ordinaires à deux meules verticales, du type des moulins à huile, le broyeur Neate à quatre meuletons légèrement inclinés et le broyeur Vanneweich, dans lequel les grains sont, à mesure qu'ils deviennent plus fins, répartis par des râcloirs en couches de plus en plus minces sur des gradins concentriques parcourus chacun par des meuletons spéciaux.

Tantôt au contraire, comme dans le broyeur Taylor, c'est le plateau qui, par sa rotation autour de l'axe central, entraîne la matière à moudre sous les meules, lesquelles ne tournent plus que sur elles-mêmes par l'effet du frottement, et peuvent se déplacer un peu en hauteur pour laisser passer les morceaux trop durs.

Qu'elles soient disposées horizontalement ou verticalement, les meules dont il vient d'être question agissent à la fois par leur poids et par frottement. D'autres appareils de broyage joignent à ces forces les petits chocs produits par la chute

de masses pesantes. Tels sont les broyeurs à boulets libres, cylindres rotatifs horizontaux dans lesquels le ciment est brassé avec des boulets de fer ou d'acier qui le triturent. Suivant les modèles, les boulets sont égaux ou de grosseurs variées et le fonctionnement est intermittent ou continu. Dans ce dernier cas, l'appareil est généralement complété par un organe de blutage qui, par des moyens variés, ramène automatiquement dans le broyeur les grains insuffisamment pulvérisés. Les types les plus répandus sont les broyeurs Löhnert ou Jenisch, Siller et Dubois, Smidth, Hanctin, Luther, Sachsenberg, Gruson, etc.

Enfin, une autre catégorie d'appareils utilise en outre la force centrifuge et écrase le ciment entre une couronne fixe et de gros boulets animés, à l'intérieur de cet espace annulaire, d'un mouvement de rotation plus ou moins rapide communiqué par des guides fixés à l'axe. Tels sont en particulier les broyeurs Morel à axe vertical ou à axe horizontal, le broyeur horizontal Pfeiffer, le broyeur Lucop et le broyeur Askham. Dans le broyeur américain Griffin, les boulets sont remplacés par un disque oscillant au bout d'un long balancier destiné à éloigner des poussières les principaux organes du mécanisme. Un appareil analogue est muni de deux balanciers symétriques, disposition qui paraît en améliorer la stabilité et le rendement. On doit classer dans le même groupe les « meuletons » articulés à force centrifuge employés à l'usine du Teil pour la pulvérisation de divers grappiers (Système Lubac).

Inversement, dans le broyeur Vapart, les matières elles-mêmes sont projetées contre des obstacles fixes, où elles se pulvérisent.

Un certain nombre des appareils qui viennent d'être énumérés conviennent bien à une mouture sommaire du ciment, mais ne peuvent, avec les produits les plus durs, tels que les portlands, donner une finesse suffisante. Aussi envoie-t-on souvent le refus des bluteries dans des appareils de mouture spéciaux appelés finisseurs, et qui se composent, la plupart du temps, d'une paire de cylindres lamineurs horizontaux dont l'écartement peut être réglé à volonté. L'un de ces

cylindres est animé d'un mouvement de rotation autour de son axe et l'autre est simplement entraîné par le frottement des matières. L'écartement des axes, maintenu par des ressorts, peut augmenter momentanément s'il vient à passer accidentellement un corps étranger trop dur.

On se contentait autrefois, pour les ciments, d'une mouture relativement grossière; mais, pour réaliser une meilleure utilisation de la matière active et pouvoir afficher des chiffres de résistances élevés, les fabricants ont été amenés peu à peu à augmenter la finesse de leurs produits. Ce résultat n'a pu être obtenu, toutefois, qu'au prix d'une élévation de dépenses assez notable, car la mouture devient de plus en plus difficile et onéreuse à mesure qu'on cherche à avoir une plus grande proportion de poussière impalpable.

Nous reviendrons sur cette question au chapitre suivant, et nous verrons notamment comment la finesse de mouture influe sur les propriétés des ciments.

32. Blutage. — Quelques broyeurs, surtout parmi ceux à boulets, peuvent être réglés de manière à donner immédiatement une poudre du degré de finesse que l'on désire. Les autres exigent que le ciment soit débarrassé par des appareils annexes des grains trop gros qu'il contient encore.

Tantôt ces appareils sont fixés directement au broyeur et lui renvoient continuellement les grains refusés. Dans ce cas, la séparation se fait presque toujours au moyen de toiles métalliques, dont la disposition varie suivant les machines. Tantôt, au contraire, ils sont bien distincts ; ils se rattachent alors à l'un des types suivants :

La bluterie le plus communément employée consiste en un tambour polygonal tournant autour de son axe, légèrement incliné sur l'horizon. Les faces sont tapissées de toiles métalliques, protégées intérieurement par des tôles perforées destinées à arrêter les plus gros morceaux. La matière moulue, introduite par l'extrémité supérieure, se trouve retournée par la révolution du tambour et retombe continuellement

contre le tamis. La poussière tamisée est envoyée au magasin et le résidu, recueilli à l'extrémité inférieure du tambour, est repassé aux meules ou livré au finisseur. En général, on met au commencement de la bluterie, où l'afflux de matière est le plus abondant, des toiles un peu moins serrées que dans sa partie inférieure. C'est l'appareil déjà décrit à propos de la fabrication des chaux et représenté par les figures 41 et 42.

La bluterie à balançoire Nagel et Kaemp consiste en un tamis plan, légèrement incliné, animé, au moyen d'un arbre à cames, d'un mouvement de trépidation continuel.

La bluterie inclinée à secousses des mêmes constructeurs présente une disposition analogue, avec cette particularité qu'on peut, sans changer le tamis, régler à volonté la finesse de la poudre, en faisant varier l'inclinaison de ce dernier et l'amplitude des trépidations. En raison de la pente prononcée du tamis, on peut obtenir un tamisage fin avec de larges mailles et, par suite, avec des toiles métalliques ou des plaques perforées plus résistantes.

Enfin, il existe des appareils qui suppriment complètement l'usage de tamis en produisant la séparation des grosseurs de grains au moyen d'un courant d'air. Tel est le principe de l'appareil Trolliet déjà cité à propos de la fabrication des chaux, et celui des séparateurs Mumfort et Moodie, Pfeiffer, etc.

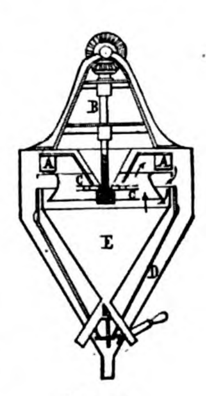


Fig. 55.

La figure 55 ci-contre représente schématiquement le séparateur Mumfort et Moodie. L'aspiration est produite par un ventilateur AA tournant autour d'un axe vertical B terminé, à sa partie inférieure, par un plateau circulaire CC. Le ciment, répandu d'une manière continue sur ce plateau, s'en échappe, sous l'action de la force centrifuge, en une nappe mince que le courant d'air traverse de bas en haut, entraînant les parties les plus fines à travers le ventilateur dans l'entonnoir extérieur D, tandis que les gros grains

retombent dans l'entonnoir intérieur E. Un système de cercles, de disques et de cônes, placé au-dessous du ventilateur et variant suivant la finesse qu'on désire obtenir, permet de régler le courant d'air.

33. Ensilage et expédition. — Quand la production est faible, le ciment est quelquefois reçu directement dans les sacs au sortir de la bluterie. Mais, le plus souvent, on l'envoie dans de grandes chambres appelées cases ou silos, où il attend en vrac l'époque où il sera mis en sacs ou en barils pour être expédié.

Dans certaines usines, la contenance de ces cases atteint jusqu'à 2.500 tonnes, et le ciment, qui y est versé encore chaud au sortir du moulin et de la bluterie, y conserve très longtemps une température assez élevée sans se modifier sensiblement. Aussi ne peut-on guère espérer que cette conservation assure l'extinction de la chaux libre de ciments provenant de pâtes trop riches en carbonate de chaux ou insuffisamment cuits. Pour rendre cette chaux inoffensive, il serait nécessaire, sinon toujours suffisant, d'étaler ces ciments en couche mince sur de grandes aires planes et de les y retourner de temps en temps, ainsi que cela se pratique, du reste, dans plusieurs usines anglaises.

En France, le ciment est généralement livré par barils de 200 kilogrammes ou par sacs de 50 kilogrammes. En Allemagne, des règles officielles fixent un poids brut uniforme de 180 kilogrammes pour les barils et de 90 kilogrammes pour les demi-barils; aussi le baril est-il devenu une unité dont les fabricants se servent plus couramment que de la tonne, notamment pour indiquer le chiffre de leur production. Il en est d'ailleurs de même dans un grand nombre de pays étrangers, notamment en Angleterre où l'on compte par « barrels » de 400 livres, soit encore d'environ 180 kilogrammes.

34. Organisation générale d'une usine à ciment. — Outre les appareils essentiels dont il vient d'être question, une usine à ciment comporte une infinité d'organes

auxiliaires, communs généralement à d'autres industries, mais dont le choix judicieux contribue à la qualité et à l'économie de la fabrication.

Sans nous arrêter à la description des machines à vapeur, hydrauliques ou électriques, nécessaires pour la production de la force motrice, ni au détail des diverses dispositions spéciales telles que balances automatiques, ventilateurs, absorbeurs de poussières, appareils à aimants pour débarrasser le ciment fini des débris de fer qu'il peut contenir, presses pour briques de pâte, batteuses de sacs, etc., nous dirons seulement quelques mots des appareils permettant de transporter les diverses matières d'un point à un autre de l'usine.

Pour les corps solides en morceaux, tels que les calcaires bruts, le charbon, les pâtes sèches, les roches cuites, etc., les wagonnets à traction mécanique ou animale et les brouettes sont, suivant les distances à parcourir, les véhicules le plus fréquemment employés ; ils servent également à transporter les matières plastiques, comme les pâtes demi-molles.

Quant aux pâtes liquides, lorsque la disposition du terrain ne permet pas de les faire couler dans des caniveaux en pente vers les points où elles doivent être envoyées, elles sont généralement recueillies dans des citernes, où des pompes les aspirent et les refoulent dans des tuyaux, ou encore les élèvent à un niveau d'où elles puissent s'écouler sous l'action de la pesanteur dans des rigoles en bois établies en l'air, qui les distribuent dans l'usine.

Pour déplacer verticalement ou obliquement des matières solides de petites dimensions, telles que les roches sortant des concasseurs, on se sert de norias ou chaînes à godets.

Enfin, pour les poudres sèches, comme les mélanges crus obtenus par le procédé à sec, les résidus de mouture ou les ciments finis, on emploie avantageusement des vis d'Archimède, des courroies transporteuses et des couloirs à secousses.

On doit d'ailleurs protéger soigneusement tous les appareils des poussières, toujours abondantes, qui les détérioreraient rapidement.

Une partie de l'usine qui doit être l'objet d'une attention toute particulière de la part du fabricant est son laboratoire. où sont faites toutes les recherches concernant la fabrication, notamment les analyses chimiques des matières crues et les essais mécaniques des ciments terminés.

Ce qui a été dit plus haut touchant la disposition générale à rechercher pour une usine à chaux s'applique également au cas des fabriques de ciment. Outre que l'usine doit toujours être desservie par une voie ferrée ou navigable et se trouver à proximité du lieu d'extraction de ses matières premières, il est évident que, toutes les fois que c'est possible, on doit chercher à grouper ses différentes parties de telle sorte que les matières parcourent le minimum de chemin, et à utiliser à leur transport l'action de la pesanteur. Toutefois, la fabrication du ciment étant plus onéreuse que celle de la chaux, à cause de la nécessité d'obtenir à une température élevée et de pulvériser des roches très dures, c'est au choix des méthodes et des appareils qu'il y a lieu d'attacher le plus d'importance, ce choix devant, d'ailleurs, dépendre des conditions économiques propres à chaque région, et tout particulièrement des prix relatifs du terrain, de la force motrice, du combustible et de la main-d'œuvre[1].

[1] La fabrication des produits hydrauliques a été décrite tout récemment, avec beaucoup de détails, par M. C. Schoch : *Die moderne Aufbereitung und Wertung der Mörtel-Materialien*, Berlin, 1896.

CHAPITRE IV

PROPRIÉTÉS

§ 1. — Propriétés immédiates

35. Aspect. — Excepté dans les cas de plus en plus rares de chaux livrées en pierres, les chaux et ciments fournis par le commerce se présentent sous la forme de poudres très fines, d'autant plus douces au toucher qu'elles contiennent moins de grains relativement gros, ce qui permet à une main quelque peu exercée d'apprécier immédiatement leur degré de mouture et de blutage.

Leur couleur, variable suivant les produits, est généralement, pour les chaux, d'un blanc d'autant plus gris qu'elles proviennent de calcaires plus argileux ; les ciments romains sont souvent jaunes ou bruns; les portlands, d'un gris foncé tirant plus ou moins sur le jaune, le bleu ou le vert; les ciments de laitier, blanchâtres. Après l'emploi, ces derniers prennent une coloration verte très foncée, qui peut persister longtemps dans les parties protégées contre le contact de l'air, mais disparaît pour faire place à la coloration jaune des sels de peroxyde de fer, partout où l'oxygène a accès dans les mortiers[1].

[1] La section encore fraiche de mortiers poreux de ciment de laitier conservés dans l'eau montre bien les deux couleurs séparées par une ligne parfaitement nette, le jaune occupant sur tout le périmètre une bande d'autant plus large que le mortier est plus poreux et immergé depuis plus longtemps. La partie vert foncé dégage une forte odeur d'acide sulfhydrique. De pareils mor-

L'examen à la loupe montre, surtout si l'on a eu soin d'éliminer la poussière impalpable, que les produits marchands sont composés de grains anguleux, d'aspects souvent fort différents. On ne peut, en effet, obtenir industriellement des composés absolument homogènes, et toutes les matières qui se présentent au défournement se retrouvent plus ou moins abondantes dans le produit moulu, avec leurs couleurs propres.

36. Finesse. — La finesse des produits hydrauliques varie suivant leur nature et le soin apporté à leur fabrication.

La présence de très gros grains, ayant par exemple plus d'un demi-millimètre de diamètre, dénote en général des négligences dans le triage et l'extinction des chaux et, dans tous les cas, un blutage insuffisant.

La proportion des grains moyens et fins restant sur le tamis de 4.900 mailles par centimètre carré dépend de la dureté des matières. Très faible pour les chaux et les ciments de laitier, elle est plus importante pour les ciments proprement dits. Dans ces derniers, elle varie d'ailleurs en même temps que les appareils de broyage se perfectionnent et suivant la demande des consommateurs.

Enfin, la poussière impalpable passant au tamis de 4.900 mailles peut elle-même être décomposée par lévigation dans des courants liquides ou gazeux de vitesses différentes, en catégories de particules de plus en plus fines. L'abondance de cette poussière dans les chaux et les ciments de laitier explique les fortes proportions d'eau nécessaires pour le gâchage de ces produits et l'onctuosité des pâtes qu'ils fournissent.

En broyant plus ou moins finement et sans blutage des roches de ciment bien homogènes, puis soumettant à des essais de lévigation les matières pulvérulentes obtenues, de manière à les séparer en différentes grosseurs de grains bien

tiers, laissés à l'air, ne tardent pas à être complètement jaunes à l'intérieur.

Avec les chaux et les ciments proprement dits, on constate seulement assez souvent, dans des circonstances analogues, une différence d'humidité au centre et le long des bords de la section de rupture.

définies, nous avons reconnu que, pour une même matière initiale, une augmentation de mouture n'avait d'autre effet que de supprimer progressivement les grains les plus gros, mais sans modifier les proportions relatives des diverses catégories de particules plus fines.

De son côté, le Dr Michaëlis a constaté que, contrairement à une opinion assez répandue, les grains de portland produits par les différents systèmes de mouture connus étaient tous sensiblement d'une même forme anguleuse et irrégulière rappelant celle des roches brutes obtenues au défournement ; un examen attentif des résultats des essais de lévigation qu'il a publiés[1] montre d'ailleurs que, si l'on élimine tous les grains supérieurs à une dimension donnée, les compositions des poudres restantes sont sensiblement les mêmes.

On conçoit donc que, quel que soit l'appareil pulvérisateur que l'on emploie et la manière dont on le fasse fonctionner, il doive être très difficile d'augmenter sensiblement la proportion de poussière impalpable.

On admet assez généralement maintenant que cette poussière est à peu près le seul élément actif, et que les gros grains sont inertes. Aussi tend-on de plus en plus à supprimer ces derniers. Quelques ingénieurs pensent néanmoins qu'une très grande finesse, gênante à cause de la prise trop rapide qu'elle occasionne et de la difficulté de conservation des ciments en magasin, serait même nuisible dans certains cas, notamment dans les travaux maritimes. Ils jugent nécessaire que le ciment contienne quelques grains relativement gros qui, par leur action tardive, soient capables de réparer les dommages produits par l'eau de mer dans les débuts du durcissement.

De nombreuses expériences de laboratoire ont établi que des mortiers de mêmes dosages faits avec un même sable et des ciments de plus en plus fins ont, après une même durée de conservation dans des conditions identiques, des résistances de plus en plus élevées. L'expérience suivante, répétée sur plusieurs ciments dans des conditions variées, nous a

[1] *Thonindustrie-Zeitung*, 1895, nos 34 et 47.

d'ailleurs permis d'évaluer approximativement la grosseur limite des grains qu'on peut considérer comme inertes.

Au moyen d'un ciment A. nous avons composé deux autres ciments B et C. en remplaçant dans le premier soit les grains retenus par le tamis de 900 mailles. soit ceux retenus par le tamis de 4.900 mailles, par une quantité équivalente de sable de même grosseur; puis. nous avons confectionné. avec les trois ciments A, B et C et un même sable ordinaire, des mortiers de même composition. dont les résistances ont été déterminées après des durées croissant jusqu'à six ans. Les ciments A et B ont toujours atteint les mêmes résistances. ce qui prouve l'inertie complète. même après plusieurs années, des grains retenus par le tamis de 900 mailles. Quant au ciment C, il a donné des mortiers dont les résistances ont été généralement à peine inférieures à celles des mortiers correspondants de ciment A. On peut donc admettre que, pratiquement, la partie active se compose presque exclusivement des grains passant au tamis de 4.900 mailles.

Le tableau ci-contre indique les nombres trouvés dans l'un des groupes d'essais où les écarts ont été les plus marqués.

La prise des pâtes de ciment pur est plus rapide pour les ciments les plus fins ; mais, si l'on considère des mortiers sableux où entre un même ciment moulu à divers degrés de finesse, en proportions telles que tous les mortiers contiennent une même quantité de poussière active, les durées de prise sont sensiblement les mêmes.

En ce qui concerne la compacité, la porosité et la perméabilité des mortiers, ainsi que les décompositions qui en résultent par le fait des agents extérieurs, l'influence de la finesse du ciment est négligeable à côté de celle du sable. Seule la résistance varie en raison du plus ou moins de poussière active contenue.

Quant aux altérations dues aux agents intérieurs ou *expansifs*, elles se manifestent différemment suivant la finesse des produits. Avec les ciments très fins, on constate, dans les essais sur pâtes pures, des gonflements sans crevasses dus à une égale dilatation de toutes les particules. Avec les ciments gros, les actions se trouvent localisées et donnent

COMPOSITION DES ÉCHANTILLONS

		Gros grains restant sur le tamis de 900 mailles	Grains moyens 900-4.900	Grains fins passant au tamis de 4.900 mailles	
		19 p. 100	31 p. 100	50 p. 100	
Ciment complet		Ciment	Ciment	Ciment	Échantillon A
Même ciment, où l'on a remplacé par du sable de même finesse les grains restant sur le tamis de :	900 mailles par cm²...	Sable	Ciment	Ciment	Échantillon B
	4.900 mailles par cm².	Sable	Sable	Ciment	Échantillon C

ESSAIS DE PRISE

		Éch^on A	Éch^on B	Éch^on C
		h. min.	h. min.	h. min.
Essai sur pâte pure. Début de prise à l'aiguille Vicat de 300 grammes		28	13	16
Essai sur mortier plastique à sable naturel (1 ciment + 3 sable)[1].... Temps après lequel une sonde carrée descendue avec précaution s'arrête à mi-hauteur dans une épaisseur de mortier de 9 centimètres.	Sonde de 5mm de côté chargée de 2.500 g.	1 30	2 10	1 35
	Sonde de 10mm de côté chargée de 1.000 g.	9 30	9 10	10 45

ESSAIS DE RÉSISTANCE

1° *Essais normaux sur briquettes immergées à l'eau de mer*

NATURE DE L'ESSAI	COMPOSITION	DURÉE	RÉSISTANCE EN KG. PAR CM². Éch^on A	Éch^on B	Éch^on C
TRACTION (Moyennes de 6 briquettes).	Ciment pur	4 semaines	29,7	47,0	21,8
		1 an......	51,8	46,3	31,5
	Mortier normal 1:3.	4 semaines	10,5	10,7	9,0
		1 an......	19,4	20,7	15,2

2° *Essais sur mortiers plastiques à 1 de ciment pour 3 de sable naturel*[1]

NATURE DE L'ESSAI	MILIEU de CONSERVATION	DURÉE	RÉSISTANCE EN KG. PAR CM². Éch^on A	Éch^on B	Éch^on C
TRACTION (Moyennes de 6 briquettes)	Eau de mer	12 semaines	8,1	8,1	8,6
		1 an......	12,7	14,6	14,4
		6 ans.....	21,1	24,3	22,8
	Eau douce	12 semaines	6,2	5,9	5,5
		1 an......	10,3	10,9	10,0
		6 ans.....	17,6	17,3	14,8
	Air	12 semaines	5,4	9,6	6,5
		1 an......	12,2	18,2	13,7
		6 ans.....	15,1	17,5	12,7
COMPRESSION (Moyennes de 2 cubes)	Eau de mer	12 semaines	23	28	18
		1 an......	38	37	28
		6 ans.....	82	81	53
	Eau douce	12 semaines	33	35	21
		1 an......	52	51	30
		6 ans.....	90	88	49
	Air	12 semaines	30	32	23
		1 an......	59	61	32
		6 ans.....	80	75	49

[1] Même composition que les mortiers du tableau III (p. 584).

naissance à des fissures. Les deux cas sont également mauvais, mais il est probable que, dans le premier, un repos du ciment avant l'emploi est plus efficace que dans le second pour l'extinction des éléments trop vifs.

Ces diverses considérations tendent à faire donner la préférence aux ciments fins, et on constate, en effet, par l'examen du tableau ci-dessous, que, depuis une vingtaine d'années, les exigences des grands consommateurs de ciment relativement à la finesse ont été continuellement en augmentant.

CONDITIONS DE RÉCEPTION ou PRATIQUES COURANTES	PROPORTION DU RÉSIDU LAISSÉ PAR 100 GRAMMES DE CIMENT SUR UN TAMIS AYANT PAR CENTIMÈTRE CARRÉ		
	400 mailles	900 mailles	4.900 mailles
Anciennes règles françaises	moins de 10	»	»
Règles allemandes (1878)	»	moins de 20	»
Pratique allemande à la même époque	»	moins de 10	»
Pratique anglaise (1880)	15 à 27	»	»
Règles danoises (1881)	»	moins de 25	moins de 50
Port de New-York (1881)	moins de 10	»	»
Règles suisses (1883)	»	moins de 15	»
Port de Leixoes (Portugal) (1884)	»	moins de 15	»
Pratique française vers 1885	0	5 à 10	25 à 30
Nouvelles règles allemandes (1886-1887)	»	moins de 10	»
Pratique anglaise (1892)	»	»	environ 40
Roumanie (1893)	»	moins de 12	»
Compagnie du chemin de fer du Nord	»	»	25 à 30
Divers cahiers de charges belges (1895-1896)	»	moins de 10	»

37. Poids spécifique. — Aux diverses catégories de chaux et ciments correspondent des poids spécifiques généralement différents, mais dont les écarts ne sont pas toujours suffisants pour permettre de caractériser bien nettement les divers produits.

Le poids spécifique de la chaux grasse éteinte en poudre étant voisin de 2,25 et celui des chaux hydrauliques les plus réputées variant généralement entre 2,70 et 2,90, on a entre ces chiffres une large marge pour toutes les chaux intermédiaires. D'autre part, les poids spécifiques des ciments portland, qui sont généralement les plus forts, varient de

3,05 environ à 3,20 et peuvent même dépasser ce nombre si la teneur en fer s'élève au-delà des proportions ordinaires. Il resterait donc entre ces deux séries de nombres une place bien étroite pour toutes les autres espèces de ciments. En réalité, les ciments de grappiers, mixtes, rapides ou naturels à prise lente ont rarement des densités inférieures à 3,00, de sorte que, s'il est à peu près certain qu'un ciment dont le poids spécifique est compris entre 3,00, et 3,05 n'appartient pas à la classe des portlands, on ne peut affirmer qu'un produit plus dense s'y rattache nécessairement. Par contre, les ciments de laitier, dont le poids spécifique oscille ordinairement entre 2,75 et 2,90, se distinguent bien nettement des ciments proprement dits, mais se confondent avec la classe des chaux hydrauliques.

Le poids spécifique d'un ciment portland est indépendant du degré de cuisson auquel ce ciment a été soumis ; au contraire, il s'abaisse généralement dès qu'on cherche à falsifier ce produit par une addition de matières étrangères. Sa détermination peut donc quelquefois fournir une indication utile.

Toutefois, il est nécessaire d'opérer sur des liants non aérés, car l'absorption de l'humidité et de l'acide carbonique abaisse le poids spécifique.

Enfin, quel que soit le produit employé, on a besoin de connaître son poids spécifique pour calculer, comme il sera exposé dans un chapitre ultérieur, la composition volumétrique élémentaire et la compacité des mortiers où il entre.

La colonne 3 du tableau I (p. 580) indique les poids spécifiques de quelques produits particuliers.

38. Densité apparente. — On appelle ainsi le poids de l'unité de volume apparent de chaux ou de ciment en poudre, élément éminemment variable suivant la méthode employée pour le mesurer, et dont on se sert souvent pour calculer le dosage en volume correspondant à un dosage donné en poids, ou inversement. Une pareille transformation n'est exacte qu'à condition que le poids de l'unité de volume ait été déduit de mesures faites dans des conditions identiques à celles du chantier particulier dont il s'agit, notamment en ce qui

concerne le volume sur lequel on opère et le degré de tassement de la poudre. Par exemple, le poids du mètre cube calculé pour un même ciment peut être de 1.250 ou de 1.350 kilogrammes suivant qu'on a opéré sur 1 litre ou sur 1 hectolitre.

C'est une erreur de croire que la densité apparente, même en supposant qu'on la mesure constamment de la même manière, puisse toujours renseigner sur la qualité d'un produit. Cette densité dépend moins du poids spécifique de la matière que de son état de division, et les poudres les plus fines sont régulièrement les plus légères. Tout au plus peut-on chercher quelques indications dans la comparaison des poids du litre de produits débarrassés de leurs plus gros grains au moyen d'un même tamis, et encore les écarts provenant de diverses causes accessoires risquent-ils, si l'on n'y prend garde, d'être du même ordre que ceux qu'on se propose de constater [1].

Ces restrictions faites, il y a généralement une assez grande différence de densité apparente entre les ciments et la plupart des impuretés qu'on peut leur mélanger. De même, si on a eu soin de supprimer tous les grains retenus par un tamis donné, on constate que les chaux et les ciments de laitier pèsent moins que les ciments proprement dits, parmi lesquels les portlands ont généralement la densité apparente la plus élevée. Toutefois, il est probable que ce résultat est dû encore en grande partie à l'état de division plus ou moins avancé de la matière restante, les substances les moins dures, telles que les chaux et les ciments peu cuits, contenant vraisemblablement une plus forte proportion de poudre impalpable.

On compte que le poids du litre non tassé de fine poussière passant au tamis de 4.900 mailles par centimètre carré varie en général de 500 à 800 grammes pour les chaux de plus en plus hydrauliques, de 700 à 1.000 pour les ciments peu cuits ou mélangés, et de 950 à 1.200 pour les portlands.

39. Composition chimique. — Nous avons donné plus haut (p. 264) le tableau des compositions moyennes des

[1] Voir notamment : *Annales des Ponts et Chaussées*, 1890, I, p. 319.

principaux liants hydrauliques. Les colonnes 4 à 10 du tableau I (p. 580) indiquent les compositions de quelques produits particuliers.

Mais, si l'analyse permet de doser avec certitude les éléments chimiques simples, il est très difficile de savoir de quelle manière ces mêmes éléments sont associés entre eux dans les produits anhydres, et *a fortiori* comment leurs groupements se modifient sous l'action de l'eau pendant la prise et le durcissement.

On connaît à peu près maintenant l'influence de la plupart des composés chimiques qu'on rencontre le plus souvent dans les produits hydrauliques, influence qui a été déjà décrite, pour le cas spécial des chaux, par MM. Durand-Claye et Derôme, dans la première partie de ce volume. (pages 66 à 72).

Dans les ciments, les effets sont sensiblement les mêmes. On verra notamment, dans le § 2 de ce chapitre, comment la chaux, la silice et l'alumine sont les principaux agents de la prise et du durcissement, auxquels paraissent contribuer aussi, quoique d'une manière moins directe, l'acide sulfurique et peut-être les alcalis et une partie du fer.

Nous dirons seulement quelques mots ici sur certaines conséquences de la présence plus ou moins abondante du fer, de l'acide sulfurique et la magnésie.

L'examen micrographique de roches de portland avant mouture et de ciments ayant fait prise a montré qu'une partie du fer jouait, pendant la cuisson, le rôle de fondant, mais que ce fondant, au milieu duquel se forment les cristaux actifs, était lui-même inerte et se retrouvait intact dans la pâte solidifiée. On doit en conclure qu'un excès de fer, résultant par exemple d'oxyde de fer introduit dans les mélanges calcaires crus pour en rendre la cuisson moins onéreuse, pourrait présenter le danger d'isoler sous une gangue inerte et imperméable les éléments actifs du ciment.

En ce qui concerne l'acide sulfurique, sa présence en trop grande proportion dans les ciments est réputée dangereuse. On a en effet constaté que l'addition d'une quantité suffisante, d'ailleurs assez faible, de gypse ou de plâtre, donnait lieu à

des décompositions, principalement dans les mortiers immergés, et plus particulièrement au contact de l'eau de mer (voir art. 116). Il est possible toutefois que le sulfate de chaux provenant du calcaire et cuit avec le ciment n'ait pas au même degré cette fâcheuse propriété et qu'on puisse en tolérer une proportion de quelques centièmes, proportion qui resterait à déterminer.

La magnésie ne mérite peut-être pas complètement la mauvaise réputation dont elle jouit depuis des accidents dus à des ciments où elle entrait en proportions notables. Il semble maintenant avéré que les gonflements constatés provenaient d'une extinction tardive de cette base dans les maçonneries déjà solidifiées. Mais, de même que la chaux s'éteint plus ou moins difficilement suivant la nature du composé dont on l'a extraite et la température à laquelle elle a été portée, il n'est pas impossible qu'on trouve, pour les ciments magnésiens, un procédé de fabrication avec lequel de pareils accidents ne seraient plus à craindre. Quoi qu'il en soit, on ne possède actuellement aucune donnée bien certaine permettant de fixer une limite à la proportion de magnésie qu'on peut sans danger tolérer dans les composés hydrauliques.

40. Action de l'air. — Il a été dit plus haut que, si l'on abandonnait à l'air des morceaux de chaux ou de ciment non encore pulvérisés, ils s'éteignaient et tombaient en miettes après des temps variables suivant leur composition chimique et la température à laquelle ils avaient été portés. Pour les produits en poudre, il en est de même, avec cette différence que les phénomènes sont accélérés par la division de la matière.

Sous l'influence de l'humidité atmosphérique, la chaux encore libre s'éteint partiellement et les grains se subdivisent en produisant une augmentation du volume apparent de la poudre. Très faible pour les chaux bien éteintes, cette action se manifeste surtout avec les ciments, principalement quand, par suite d'une cuisson insuffisante, ils contiennent une forte proportion de chaux libre ou faiblement combinée.

En même temps, l'acide carbonique de l'air se combine à

une partie de la chaux des composés hydrauliques et la rend impropre à participer à la prise, ce qui diminue leur énergie.

Enfin, l'éventation se prolongeant, l'humidité peut provoquer une prise partielle, qui se manifeste par la présence de grumeaux plus ou moins durs. On dit alors quelquefois que le ciment est *garrotté*.

Des analyses de pareils grumeaux et de ciments arrivés à un moindre degré d'éventation nous ont montré qu'en général le poids d'acide carbonique contenu était à peu près double de celui de l'eau absorbée.

Plus particulièrement, les effets de l'éventation sur les ciments portland ont été mis en évidence par d'assez nombreuses expériences, qui correspondent bien aux observations de la pratique.

En général, on constate que les ciments de fabrication toute récente ont une tendance à se gonfler après l'emploi en se couvrant de veines plus ou moins développées. Une éventation modérée provoque l'extinction des composés trop expansifs et supprime en partie ce grave inconvénient.

En même temps, la prise subit des modifications parfois considérables et finit toujours par se ralentir pour une éventation suffisamment prolongée, non sans s'être souvent notablement accélérée auparavant [1].

Enfin, les résistances de mortiers conservés dans des conditions identiques sont généralement d'autant plus faibles que le ciment a été plus longtemps aéré avant l'emploi. Cependant on observe quelquefois un léger maximum de résistance correspondant à une éventation modérée. Les deux tableaux ci-contre, dont le premier est extrait d'un mémoire où nous avons traité avec quelque détail la question de l'éventation des portlands [2], rendent compte d'une partie des phénomènes qui viennent d'être décrits.

Il résulte de ce qui précède que, si une éventation exagérée a l'inconvénient d'affaiblir les ciments, par contre il est

[1] M. Candlot explique cette accélération par une combinaison qui se produirait au contact de l'eau entre le sulfate de chaux et l'alumine, et qui se trouverait contrariée, dans le cas des ciments frais, par la présence de la chaux libre.

[2] *Annales des Ponts et Chaussées*, 1890, I, p. 364 à 375.

ÉTAT D'ÉVENTATION du ciment avant l'emploi		DURÉE de PRISE		PROPORTION D'EAU employée pour le gâchage		RÉSISTANCES APRÈS DIVERSES DURÉES D'IMMERSION A L'EAU DE MER (en kilogrammes par cm²)																							
						TRACTION (Moyennes de 6 briquettes de 5 cm²)												COMPRESSION (Moyennes de 4 cubes de 50 cm²)											
						CIMENT PUR						MORTIER SABLEUX NORMAL 1 : 3						CIMENT PUR						MORTIER SABLEUX NORMAL 1 : 3					
Durée d'aération [1]	Perte au feu	Commencement	Fin	Ciment pur	Mortier sableux normal	1 semaine	4 semaines	12 semaines	26 semaines	1 an	2 ans	1 semaine	4 semaines	12 semaines	26 semaines	1 an	2 ans	1 semaine	4 semaines	12 semaines	26 semaines	1 an	2 ans	1 semaine	4 semaines	12 semaines	26 semaines	1 an	2 ans
	p. 100	h. m.	h. m.	p. 100	p.100																								
Néant [2]	0,45	0 45	3 40	25	12	28,3	38,8	48,5	56,2	58,8	57,6	12,3	15,0	20,7	21,5	26,1	29,6	150	261	314	380	394	415	74	95	102	120	138	148
1 semaine.....	1,70	1 30	4 45	25	12	28,8	43.2	51,3	58,6	59,2	61,6	10,7	13.6	18,2	21,3	25,8	27,0	144	223	308	365	416	403	73	95	110	123	139	130
2 semaines....	2,30	5 00	6 45	25	12	23,9	38,8	52,6	61,5	61,9	59,8	9,5	13,8	18,3	21,9	25,9	23,8	128	190	244	303	288	367	67	94	103	120	136	141
4 semaines....	3,50	5 15	9 30	25	12	21,1	33,9	43,8	50,1	48,1	55,5	7,3	11,9	17.0	18,9	21,9	24,3	108	151	229	318	335	398	51	73	83	100	110	110
12 semaines....	8,00	1 40	4 50	30	12	5,4	14,8	21,8	28,3	36,5	37,8	2,3	6,9	11.5	16,1	19,3	21,6	24	56	91	136	176	290	20	35	50	64	76	99
24 semaines.....	10,85	2 00	11 00	33	12	6,6	10,7	15,2	20,3	25,1	31,1	3,9	8,3	11,7	14,1	17,3	18,4	24	47	75	113	150	233	16	33	43	57	63	92

1 Même ciment portland exposé en couche mince dans une atmosphère humide; de temps en temps on écrasait les grumeaux formés et on retournait le ciment.
2 Ciment gâché au sortir de la bluterie, après refroidissement.

ÉTAT D'ÉVENTATION du ciment avant l'emploi		DÉBUT DE PRISE (gâchage à l'eau de mer)	MILIEU d'exposition des éprouvettes	ESSAIS DE RÉSISTANCE						
				RÉSISTANCES A LA TRACTION PAR CENTIMÈTRE CARRÉ				RÉSISTANCES A LA COMPRESSION PAR CM^2		
				Ciment pur		Mortier sableux normal 1 : 3		Mortier plastique 1 ciment + 3 sable naturel		
Durée d'aération[1]	Perte au feu			4 semaines	1 an	4 semaines	1 an	12 semaines	1 an	6 ans
	p. 100	h. min.								
Néant.....	1,35	1 00	Eau de mer	48,2	53,5	15,0	24,7	53	68	123
			Eau douce	»	»	»	»	57	85	149
			Air	»	»	»	»	54	86	139
10 jours...	3,70	0 20	Eau de mer	34,5	50.0	13,8	22,5	34	44	104
			Eau douce	»	»	»	»	43	77	121
			Air	»	»	»	»	47	77	122
4 semaines.	6,90	3 00	Eau de mer	19,7	38,8	11,8	19,8	30	43	84
			Eau douce	»	»	»	»	45	70	110
			Air	»	»	»	»	34	47	77

1 Même ciment portland exposé en couche mince dans une atmosphère humide ; de temps en temps, on écrasait les grumeaux formés et on retournait le ciment.

souvent dangereux d'employer des produits trop frais, de sorte qu'en somme on doit se, tenir dans un juste milieu. Nous pensons que, tant que la proportion totale d'eau et d'acide carbonique absorbée (perte au feu) n'excède pas 5 pour 100 du poids du ciment en poudre, on n'a pas à s'inquiéter de la perte de résistance due à l'éventation. Si la teneur en éléments volatils est plus forte, le ciment ne doit pas être nécessairement rejeté pour cela, mais il y a lieu d'en augmenter la proportion dans les mortiers [1].

On ne peut fixer *a priori* de durées de conservation limites correspondant, d'une part, à l'extinction des expansifs dangereux et, d'autre part, à un affaiblissement exagéré du ciment, car la vitesse d'absorption de l'eau et de l'acide carbonique dépend éminemment de l'état atmosphérique dominant et des conditions de magasinage et de conservation. En barils, le ciment se maintient très longtemps intact ; en sacs, il

[1] Il est évident que cette règle ne s'applique ni aux chaux ni aux ciments de laitier qui, à l'état frais, ont déjà une perte au feu assez importante correspondant à l'eau d'extinction qu'ils contiennent.

subit des modifications plus rapides, surtout dans le voisinage de la toile, et le gonflement résultant peut finir par crever cette dernière. Il est donc difficile de juger de l'état d'éventation d'une provision uniquement d'après le temps qui s'est écoulé depuis qu'elle a été livrée ; il est plus sûr de soumettre des échantillons de ciment, pris de temps en temps en divers points du magasin, à des essais de perte au feu, d'invariabilité de volume, de prise et de résistance.

Dans tous les cas, il importe de ne jamais laisser sur les chantiers les sacs ou les barils ouverts ou insuffisamment protégés des intempéries, car le ciment se détériorerait rapidement.

Il est évident que l'action de l'air ne doit pas se produire avec la même énergie sur les diverses sortes de composés hydrauliques, et que ceux qui ont le plus d'affinité pour l'eau doivent être modifiés plus rapidement. C'est ainsi que les ciments à prise rapide, conservés en magasin, perdent en grande partie, après un temps relativement court, leur propriété caractéristique. Inversement, les ciments de laitier et surtout les chaux hydrauliques, dont la prise est généralement plus lente que celle des portlands, paraissent se conserver plus longtemps que ces derniers sans subir d'altérations préjudiciables. Du reste, ces composés, où la chaux se trouve surtout à l'état d'hydrate, doivent avoir, si l'extinction a été complète, très peu d'affinité pour l'humidité de l'atmosphère et n'être attaquables que par son acide carbonique.

Enfin, des liants de même nature, mais différant par leur finesse, doivent s'éventer d'autant plus vite qu'ils sont plus divisés.

Mais, quels que soient les produits que l'on compare, il serait injuste de considérer la tendance à l'éventation comme une cause d'infériorité de ceux qui la présentent au plus haut degré. Au contraire, elle dénote ordinairement une énergie plus grande, supériorité qui, le plus souvent, subsiste encore après l'action modérée de l'air humide.

41. Action de l'eau ou des solutions salines en grand excès. — Agités avec un grand excès d'eau, les

produits hydrauliques en poudre subissent une décomposition partielle qui augmente avec le temps. Mais les phénomènes constatés ne sont pas nécessairement ceux auxquels est due la prise, car l'état de dilution des éléments est très différent dans les deux cas, et dès lors les conditions d'équilibre chimique ne sont pas les mêmes.

Pour une raison analogue, il serait inexact de considérer comme chaux libre celle qui se dissout dans un excès d'eau et de chercher à doser ainsi cet élément. On constate d'ailleurs que la proportion de chaux enlevée à un même ciment varie dans de très larges limites suivant les conditions de l'expérience. En réalité, il se produit une décomposition incomplète de sels calcaires peu stables au contact de l'eau, décomposition lentement progressive et qui s'arrête plus ou moins loin suivant la température, la quantité d'eau, la nature et les proportions des divers autres éléments en présence.

Le tableau ci-dessous indique les quantités de chaux enlevées à un même ciment portland dans différentes conditions de temps et de masses, la température restant constante, par de l'eau pure ou par de l'eau sucrée à 1 : 10.

Poids de ciment mis au contact d'un litre de liquide.		2	10	50	10	10	10	grammes
Durée du contact (agitations fréquentes)		15 minutes	15 minutes	15 minutes	2 heures	24 heures	7 jours	
Poids de chaux dissous par litre d'eau	pure...	0,13	0,19	0,36	0,24	0,29	1,09	grammes
	sucrée.	0,18	0,47	0,66	0,52	0,64	0,68	grammes
Poids de chaux enlevé à un poids 100 de ciment par l'eau	pure...	6,5	1,9	0,7	2,4	2,9	10,9	p. 100
	sucrée.	9,0	4,7	1,3	5,2	6,4	6,8	p. 100

En agitant du ciment portland en poudre avec quatre fois son poids d'eau dans une série de flacons identiques bien bouchés, filtrant chaque flacon après une durée de contact différente et analysant les liquides recueillis, nous avons constaté qu'il se dissolvait tout d'abord des alcalis, de la chaux, de l'acide sulfurique et parfois de l'alumine. Après une durée qui n'excède généralement pas une demi-heure,

cette dernière disparaît du liquide; en même temps la proportion d'acide sulfurique existant à l'état de composés solubles décroît d'autant plus vite, semble-t-il, que le produit est à prise plus rapide, et finit aussi par s'annuler, de sorte qu'il ne reste plus à la fin dans le liquide que de la chaux et des alcalis libres [1].

Si l'on opère avec une quantité d'eau notablement plus considérable et qu'on prolonge l'expérience pendant plusieurs jours et même plusieurs mois, on constate que l'alcalinité du liquide augmente avec le temps jusqu'à une limite dépendant de la nature du ciment et de la quantité d'eau employée. En outre, à partir du moment où le ciment a manifesté une tendance à faire prise, tendance qu'on doit avoir soin de contrarier par des agitations répétées, il se forme généralement au sein du liquide des flocons d'une extrême légèreté, dont le volume peut devenir considérable.

En traitant de même le ciment par des acides très dilués ou diverses solutions salines, on observe encore que les résultats dépendent de la durée du contact et du volume de solution employé. On ne peut donc songer à décomposer par ce moyen les produits hydrauliques en leurs principaux éléments constituants, ou plutôt ceux-ci, éminemment instables dans de pareilles conditions, subissent une dissociation plus ou moins complète, suivant la nature et les proportions des divers corps en présence.

Un cas particulier intéressant est celui où l'on fait agir sur la chaux ou le ciment une dissolution de chlorure de magnésium ou de sulfate de magnésie. Une partie de la chaux du composé hydraulique se combine à l'acide de ce sel, et la magnésie se dépose en une boue blanche sans consistance. Cette expérience, faite pour la première fois par Vicat, explique en partie l'action décomposante de l'eau de mer sur les mortiers. De même, un sulfate soluble donne, avec la

[1] M. Candlot a fait un grand nombre d'essais du même genre, qui l'ont conduit à des conclusions intéressantes (*Ciments et Chaux hydrauliques*, Annexe II). Toutefois sa méthode, qui consistait à faire tous les prélèvements dans un même flacon en remplaçant chaque fois le liquide enlevé par de l'eau pure, avait l'inconvénient de modifier continuellement les conditions de l'expérience.



chaux du composé hydraulique, du sulfate de chaux qui, lorsqu'il se rencontre dans les mortiers au-delà d'une certaine proportion assez minime, peut occasionner, surtout au contact de l'eau, les gonflements les plus dangereux.

§ 2. — Prise et durcissement

42. Définitions. — On appelle *prise* d'un mélange dans lequel une chaux ou un ciment se trouve en contact intime avec l'eau, l'ensemble des phénomènes par lesquels ce mélange passe de l'état plus ou moins plastique à l'état solide ; on appelle *durcissement* l'augmentation progressive de consistance de la masse déjà solidifiée.

La prise commence-t-elle dès l'introduction de l'eau ou seulement après un certain temps ? On peut citer l'exemple du plâtre qui, mis dans l'eau, s'y dissout et ne cristallise qu'après plusieurs minutes, en donnant lieu à une prise nette et presque instantanée. Avec les ciments et surtout les chaux, composés moins homogènes que le plâtre, la transition est rarement aussi brusque.

L'action de l'eau commence immédiatement, mais peut ne se manifester que plus tard par un changement de consistance ; puis la plasticité diminue insensiblement, et la masse devient capable de résister sans déformation apparente à des efforts de plus en plus importants.

La définition de l'état *solide* n'ayant rien de bien absolu, il est difficile de dire à partir de quel moment on peut considérer le mortier comme passé à cet état et de fixer une limite précise correspondant à la fin de la prise et au commencement du durcissement.

En réalité, le durcissement n'est autre chose que la continuation de la prise, et ces deux phénomènes sont deux phases consécutives d'une même action. Nous les étudierons donc simultanément.

43. Rôle de l'acide carbonique. — Pour un certain nombre de composés, l'acide carbonique contenu dans l'air ou dans l'eau est le principal agent de solidification.

Si l'on abandonne dans de l'air privé d'acide carbonique une pâte de chaux grasse ou maigre, elle se dessèche en subissant un retrait accompagné de fendillements, comme le ferait de l'argile molle, et n'acquiert, si longtemps qu'on fasse durer l'expérience, d'autre consistance que celle qui résulte du rapprochement des molécules occasionné par cette dessiccation.

Dans l'air ordinaire, la même pâte absorbe l'acide carbonique par sa surface, qui, par suite de la formation du carbonate de chaux, peut acquérir une certaine dureté. Mais cette action est limitée, au moins dans les premiers temps, à une couche superficielle très mince, et ne progresse ultérieurement qu'avec une extrême lenteur. Elle est d'ailleurs très variable suivant l'état de la pâte et peut être à peu près nulle si celle-ci est trop mouillée ou trop sèche. Les meilleures conditions sont une humidité modérée et une légère porosité ; à ce dernier point de vue, il est avantageux de diviser la chaux par des grains de sable.

La nature des surfaces influe également sur l'absorption de l'acide carbonique, qui est d'autant plus importante que celles-ci sont plus rugueuses. La figure 56, reproduite

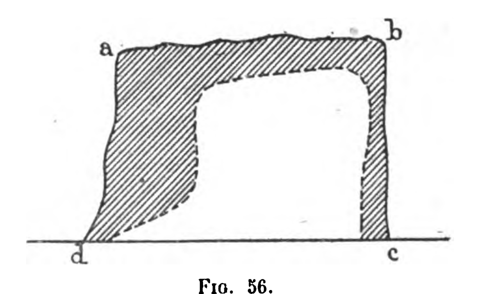


Fig. 56.

d'après Vicat, indique par des hachures l'étendue de la carbonatation sur les diverses faces d'un bloc de pâte de chaux âgé d'un an. La partie *cd* était en contact avec un madrier ; le parement *bc* avait été lissé à la truelle, la face *ab* était rude, et la partie *ad* avait été fracturée.

Exposée dans un lieu humide et où l'acide carbonique n'a pas accès, la pâte de chaux grasse reste indéfiniment molle.

Au point de vue de la prise et du durcissement maigres présentent les mêmes caractères que la ch sauf que la pâte est moins onctueuse et subit u retrait par dessiccation.

Quant aux chaux plus ou moins hydraulique fendillent moins et doivent aux éléments chimiq gers qu'elles renferment à l'état de combinaison leu de faire prise sous l'eau. Néanmoins, elles contienn une proportion variable d'hydrate de chaux, qui p durcissement à la manière de la chaux grasse et sub cette dernière, l'influence favorable de l'acide ca

Il semble même résulter d'analyses faites par Vic mortiers de diverses compositions, dont certains d plusieurs siècles, qu'à la longue cet acide doive chasser les autres éléments, tels que la silice, d naisons qu'ils forment avec la chaux, de sort mortiers, qu'ils soient à chaux grasse ou à chaux lique, tendraient vers un état final dans lequel serait totalement carbonatée.

Dans la prise des ciments, qui se produit en heures, l'acide carbonique ne joue qu'un rôle tout à daire ; par contre, il intervient utilement pendant ement, en neutralisant, partout où il peut accéde de chaux libre que le ciment pouvait contenir, l'hydrate de chaux mis en liberté par les réacti prise. On peut s'en rendre compte en comparant tances de briquettes identiques conservées les une de l'acide carbonique, les autres au contact de ce une atmosphère maintenue humide.

Enfin, l'acide carbonique dissous dans l'eau de m des agents protecteurs les plus efficaces contre le positions provoquées par les éléments salins de c en ce qu'il forme avec la chaux dissoute par ell mortier une croûte solide qui tend à imperméa maçonnerie [1].

[1] Diverses analyses de pareilles croûtes nous ont montré qu'en étaient composées de mélanges en proportions variables d'hydr carbonates de chaux et de magnésie.

44. Action pouzzolanique. — Une seconde cause de durcissement des matériaux d'agrégation est, dans certains cas, l'action dite pouzzolanique exercée sur la chaux de ces composés par les éléments avec lesquels on les mélange pour former le mortier.

Si, comme le faisait Vicat pour apprécier l'énergie d'une pouzzolane, on met cette matière, réduite en poudre impalpable, en contact avec un volume connu d'eau de chaux titrée, on constate, après une certaine durée de conservation du mélange à l'abri de l'acide carbonique, que l'eau de chaux s'est appauvrie ; il y a donc eu combinaison chimique entre la chaux enlevée et certains des éléments de la pouzzolane.

De nombreux essais faits ainsi, tant par Vicat que par d'autres expérimentateurs, n'ont révélé aucune relation nette entre l'affinité des matières pour la chaux et leur composition chimique. Certaines pouzzolanes de compositions rigoureusement identiques donnent même des résultats variables suivant leur état physique naturel ou leur mode de préparation. Il ressort néanmoins de ces essais que la silice seule, lorsqu'elle se rencontre à un certain état de solubilité, d'ailleurs mal défini, peut jouir de propriétés pouzzolaniques très développées.

Il est donc indiscutable que l'un des composés qui prennent naissance et peuvent produire le durcissement est un silicate de chaux.

Quant aux autres éléments, leur rôle est mal connu.

Il semble que certains d'entre eux, en particulier l'alumine, contribuent parfois à augmenter l'énergie des pouzzolanes, mais on ne peut dire s'ils agissent alors directement sur la chaux pour former des composés nouveaux participant au durcissement du mélange, ou si leur présence, à l'état de combinaison avec la silice, n'a pas d'autre effet que de rendre cette dernière plus facilement assimilable. Nous avons dit notamment, en décrivant la fabrication du ciment de laitier, que l'empirisme seul avait, jusqu'à présent, indiqué la composition des laitiers à employer.

L'analyse de mortiers antiques faits avec des chaux grasses



a montré que parfois les sables siliceux parais plus inertes pouvaient, à la longue, céder à la ch partie de leur silice, résultat qui a été confirmé par d riences directes (Petzholdt).

Avec les pouzzolanes naturelles proprement dite argiles cuites, l'action est encore assez lente ; il d'ailleurs, pour que ces matières puissent développe leur énergie, qu'elles soient réduites en une poud trême finesse.

Les mélanges de chaux et d'une pouzzolane s qu'on emploie depuis quelques années tout prépar le nom de ciments de laitier, ont une énergie inf supérieure, ainsi qu'en témoignent la prise relati rapide et les fortes résistances atteintes presque imn ment par ces composés. Ces qualités tiennent en par grande finesse et à l'homogénéité du mélange ; ma sont dues aussi à ce que le laitier granulé a pour la une affinité bien supérieure à celle des pouzzolane rieurement employées, ainsi que nous l'avons d' vérifié directement en comparant, par la méthode de ces diverses matières amenées préalablement à un degré de finesse.

Enfin, le rôle utile des pouzzolanes n'est pas limi mélanges qu'elles peuvent fournir avec les chaux ou hydrauliques, et il est évident que leur affinité chaux s'exercera toutes les fois qu'elles se trouveront sence de cette base. En particulier, si on les assoc ciments, elles devront se combiner avec la chau préexistante, s'il y a lieu, et, en tous cas, avec l'hyd chaux mis en liberté par les réactions de la prise h lique, et cette action devra favoriser le durcissemen en atténuant les inconvénients d'un excès de chaux ce qu'ont paru montrer, depuis déjà un certain n d'années, quelques expériences, dont les conclusion d'ailleurs, été contestées.

De notre côté, nous poursuivons depuis quelque tem série de recherches, non encore publiées, d'où il résul l'addition de certaines matières pouzzolaniques peut



bien des cas, corriger l'excès de chaux des ciments et augmenter leurs résistances. Nous n'en donnerons ici comme exemple que le tableau ci-dessous, qui relate des essais de résistance faits, après conservation dans l'eau de mer (immersion 48 heures après le gâchage), sur des mortiers dans lesquels un même ciment portland et un même sable grenu avaient été additionnés de matières plus ou moins pouzzolaniques amenées à une finesse voisine de celle du ciment.

DÉSIGNATION de la MATIÈRE POUZZOLANIQUE	COMPOSITION du MORTIER en poids			RÉSISTANCE A LA COMPRESSION (kilogrammes par cm²) après	
	ciment	matière pouzzolanique	sable grenu	4 semaines	1 an
Néant	2	0	4	51	104
Sable de grés [1]	1	1	4	18	51
Gaize [2]	1	1	4	49	143
Trass	1	1	4	54	89
Laitier granulé [3]	1	1	4	131	179

[1] Ce sable contenait 20 pour 100 de calcaire introduit lors de la mouture.
[2] Pouzzolane naturelle des Ardennes contenant environ 97 p. 100 de silice.
[3] Laitier servant à la fabrication de ciment de laitier.

Ces nombres confirment ce qui vient d'être dit sur les pouvoirs pouzzolaniques croissants du sable siliceux, des pouzzolanes naturelles et des laitiers granulés, et montrent notamment que les mélanges par parties égales de ciment et de pouzzolanes naturelles ont eu à peu près la même énergie que le ciment pur.

Nous reviendrons plus loin (art. 111) sur ce sujet, en montrant comment on peut tirer parti de ces propriétés dans la pratique.

45. Prise hydraulique. — La qualité caractéristique des matériaux hydrauliques proprement dits est de donner, quand on les mouille, même sans addition d'autres matières,

des pâtes capables de faire prise dans l'eau, sans l'intervention de l'acide carbonique.

Nous avons cité, dans l'aperçu historique dont nous avons fait précéder cette étude, les premières recherches ayant eu pour but d'expliquer la cause initiale de l'hydraulicité. A partir du jour où Vicat eut définitivement établi qu'elle résidait dans les éléments de l'argile préexistant ou introduite artificiellement dans les calcaires, le problème qui se posa consista à déterminer :

1° Les groupements formés pendant la cuisson entre la chaux et les divers éléments de l'argile ;

2° Les réactions provoquées par l'eau entre les composés en présence ;

3° Le mécanisme du durcissement occasionné par ces réactions.

Nous n'entreprendrons pas l'analyse des nombreux travaux qui ont été publiés sur ces questions.

Bien que la plupart soient dus à des savants de premier ordre et contiennent les observations les plus judicieuses, les conclusions diffèrent suivant les auteurs. Ces divergences nous paraissent provenir de deux causes principales qui sont, d'une part, la difficulté de reproduire en petit, dans un laboratoire, avec des matières pures, les conditions industrielles de cuisson des ciments, et, en second lieu, l'extrême instabilité des sels hydrauliques en présence de l'eau et leurs dédoublements incomplets en composés dont les formules doivent différer suivant la quantité d'eau qu'on fait agir.

Parmi les recherches les plus connues sur la prise et le durcissement hydrauliques, il convient de citer celles de Vicat, Fuchs, Kuhlmann, Pettenkofer, de Villeneuve, Vogel, Bauer, Feichtinger, Winckler, Rivot et Chatoney, Harms, Latzko, Dullo, Heldt, Chevreul, Wallace, Mulder, Lieven, Frémy, Schönaich-Carolinath, Michaëlis, Schulatschenko, Schott, Knapp, Erdmenger, Heintzel, Hauenschied, Mertz, Le Chatelier, Landrin, Tetmajer, Frühling, Merceron-Vicat, Michel, Bonnami, Camerman, Candlot, etc., etc. [1].

[1] Un grand nombre de ces travaux sont résumés dans l'ouvrage de Feichtinger : *Die chemische Technologie der Mörtelmaterialien* (Brunswick, 1885).

Quelques-unes des théories qui ont été émises expliquent la prise par une simple action pouzzolanique des produits résultant de la cuisson de l'argile, sur la chaux libre qui se trouverait en excès dans les ciments. Cette opinion, défendue notamment par Frémy, a été à peu près abandonnée, et on admet généralement aujourd'hui, avec un grand nombre des auteurs précités, que la prise est le résultat de l'hydratation de sels calcaires produits pendant la cuisson ou d'autres sels analogues résultant du dédoublement des premiers au contact de l'eau.

Mais on est encore loin d'être fixé sur le nombre et les formules de ces sels, et *a fortiori* sur leurs réactions mutuelles.

Les composés qui prennent naissance par l'action de la chaleur sur les calcaires plus ou moins argileux dépendent des proportions des éléments en présence et des conditions de la cuisson. Il est probable qu'il peut se former un très grand nombre de sels simples ou multiples ayant pour acides la silice, l'alumine, les acides ferreux et ferrique et l'acide sulfurique, et pour bases la chaux, la magnésie, les alcalis et peut-être les oxydes de fer et l'alumine.

Les mieux connus sont l'aluminate de chaux, $Al^2O^3, 3CaO$, qui fait prise très rapidement, et surtout le silicate de chaux $SiO^2, 3CaO$, qui, depuis les travaux de M. H. Le Chatelier, est à peu près généralement considéré comme le principal élément actif des ciments. Ce savant a reconnu notamment, en examinant au microscope polarisant des lames minces taillées dans des roches de ciment non moulu, que le silicate tricalcique existait en grande abondance dans le ciment anhydre sous forme de cristaux bien définis, qui ne se retrouvaient plus dans les ciments ayant fait prise. Par contre, ces derniers contiennent des cristaux d'hydrate de chaux souvent très développés.

Dès lors, la réaction fondamentale doit être le dédoublement du silicate tricalcique en chaux et en un silicate moins basique, qui s'hydratent et cristallisent en produisant le durcissement. M. Le Chatelier a représenté cette réaction par la formule :

$$SiO^2,3CaO + aq. = SiO^2,CaO,2,5HO + 2\,(CaO,HO).$$

Le même auteur admet que l'aluminate tric:
drate simplement au contact de l'eau, comme le
production de solutions fortement sursaturées:

$$Al^2O^3,3CaO + aq. = Al^2O^3,3CaO,12H($$

Ce sel, d'après les recherches de M. Candlo
M. Michaëlis [2], se combinerait à deux équivalent
sulfate de chaux pour former un sel double crist
une très grande quantité d'eau et paraissant jo
important dans la destruction des mortiers par l

Si l'on ne possède encore que très peu de co
positives sur les sels actifs des composés hydı
sur les réactions auxquelles ils donnent lieu au
l'eau, le mécanisme de la prise paraît avoir ét
ment expliqué par M. Le Chatelier, par les pr
dissolutions des divers hydrates d'un même sel.

En général, ces hydrates ont des solubilités
et celui qui, dans des conditions d'expérience d
est le moins soluble, est aussi le plus stable dans
conditions.

Dès lors, si l'on met un hydrate plus soluble e
d'une quantité d'eau insuffisante pour le dissoud
ment, il se produit une dissolution saturée et i
l'hydrate le moins soluble précipite bientôt, tandi
qu'il abandonne redissout une nouvelle quantit
mier ; cet échange et la précipitation cristalline qu
pagne se continuent sans interruption jusqu'à l'é
de l'eau ou du composé initial.

« Le durcissement des produits hydrauliques, é
Chatelier [3], paraît donc bien être, dans tous les ca
tat de la cristallisation de composés hydratés qui
momentanément par l'état de dissolution. Mais
d'une masse cristalline semblable peut varier

[1] *Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industri*
juillet 1890, et *Ciments et Chaux hydrauliques*, p. 250.
[2] *Résistance des matériaux hydrauliques à la mer*. Bruxelles, 1
[3] *Annales des Mines*, septembre-octobre 1893.

limites considérables avec la forme, les dimensions et le mode d'agrégation des cristaux ainsi produits. En général, la cohésion, la dureté d'un cristal isolé, est bien supérieure à son adhérence aux cristaux voisins; plus les surfaces des cristaux en contact seront développées, plus l'adhérence totale, la résistance de la masse sera grande. Des cristaux en longues lamelles ou en filaments enchevêtrés devront donner une résistance considérable. Or, il se trouve précisément que tous les cristaux qui se déposent de solutions sursaturées présentent ce caractère, et le présentent d'une façon d'autant plus marquée que la solution est plus fortement sursaturée. La cristallisation des solutions sursaturées de sulfate de soude, acétate de soude, hyposulfite de soude, donne des cristaux filiformes d'une longueur de plusieurs centimètres avec une épaisseur inférieure à 1/10 de millimètre. On peut reconnaître qu'il en est de même dans la prise du plâtre, celle des aluminates de chaux, etc. Mais cet allongement considérable et la solidité qui en résulte peuvent varier dans des limites considérables avec le degré de sursaturation du liquide, qui dépend lui-même de conditions multiples: finesse du sel anhydre, nombre des centres de cristallisation, etc. C'est le motif pour lequel des produits hydrauliques très voisins donnent souvent à l'emploi, dans les travaux ainsi que dans les essais de résistance, des résultats aussi différents. »

M. Le Chatelier ajoute que, pour qu'il y ait durcissement, il est nécessaire que le sel anhydre puisse subsister quelque temps au contact de l'eau sans s'y combiner et en s'y dissolvant simplement. Avec certains corps très avides d'eau, comme la chaux vive, l'hydratation se produit sans dissolution préalable avec désagrégation et gonflement de la matière.

46. Allure de la prise et du durcissement. — La succession des états de dureté par lesquels passe une pâte ou un mortier hydraulique pendant la prise et le durcissement ne paraît obéir à aucune loi déterminée.

Durant la période de plasticité, on peut se rendre compte

approximativement[1] de ces états en mesurant d
temps, sur une masse bien définie de matière,
non traversée par une tige de dimensions et de
minés, ou encore l'effort nécessaire pour faire p
tige donnée jusqu'à une profondeur toujours la
que le mélange a acquis une certaine consistan
simple est de soumettre à des essais échelonné
tance des éprouvettes pareilles confectionnées av
mélange et conservées dans des conditions identi

Dans tous les cas, il est commode de traduire
ment les phénomènes au moyen de courbes
abscisses les durées écoulées depuis le gâchag
ordonnées les épaisseurs non traversées, les effor
tration ou les résistances.

De très nombreux essais nous ont montré que
des épaisseurs non traversées avaient presque t
forme d'une S plus ou moins allongée ABC (*fig.* 5

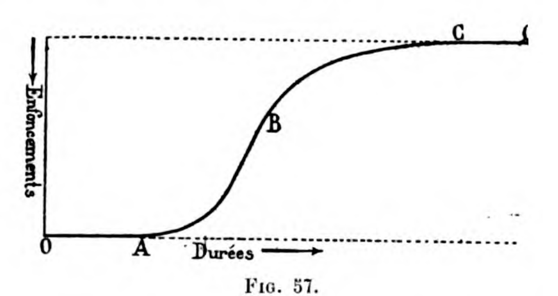


Fig. 57.

cordant tangentiellement avec les lignes horizon
respondant à un enfoncement total (du moins pou
pures et les mortiers de sable très fin) (ligne OA
enfoncement nul (ligne CC'). Si l'on a soin de tou
l'essai dans les mêmes conditions, on constate que
ciments rapides, le point A est relativement p

[1] On ne sait pas encore définir d'une manière complète et r
degré de consistance d'un corps à l'état pateux ; à ce sujet, voi
insérée dans les *Rapports de la Commission des Méthodes d'Essai d*
de Construction, t. IV, p. 127.



point O, et la courbe ABC, dont l'allure est rapidement ascendante, se confond presque avec une droite verticale. Au contraire, avec les produits lents, tels que les ciments de laitier et surtout les chaux, le point de départ A de la courbe est, en général, éloigné du point O et celle-ci, peu inclinée sur l'axe des abscisses, se raccorde lentement avec ses deux tangentes. Toutefois, il peut se faire, avec certains produits, qu'on constate une montée brusque, quoique commencée tardivement, ou, au contraire, une courbe se détachant de sa tangente inférieure peu de temps après le gâchage, mais lentement ascendante et n'atteignant que fort tard sa tangente supérieure.

Dans quelques cas (*fig.* 58), il nous est arrivé de constater un palier, indiquant vraisemblablement un arrêt mo-



Fig. 58.

mentané de la prise (trait plein), ou même une retombée de la courbe, semblant correspondre à une période de ramollissement, et suivie d'une nouvelle prise (trait pointillé).

Dans le même ordre d'idées, un phénomène bien connu des opérateurs qui ont l'habitude d'essayer les ciments est celui de la double prise, que l'on constate avec certains échantillons. Il se produit pendant le gâchage une première prise très rapide, qui se trouve détruite par une manipulation plus prolongée, puis la pâte ne recommence plus à durcir qu'après un temps souvent assez long.

Avec les mortiers sableux, ce phénomène est moins net; pourtant, on sait que les maçons arrivent par un nouveau brassage avec ou sans addition d'eau, à rendre à des mor-

tiers en partie durcis leur plasticité primitive. M. Candlot a montré que cette pratique était défectueuse[1].

Il n'a été fait que très peu d'essais de prise par des mesures d'efforts de pénétration :

Les figures 59 et 60, établies d'après des données numériques fournies par M. Le Chatelier[2], représentent, en fonction des temps écoulés depuis le gâchage, les efforts nécessaires pour faire pénétrer une aiguille d'un millimètre carré de section à une profondeur constante de 20 millimètres, dans une masse de pâte épaisse de 50 millimètres.

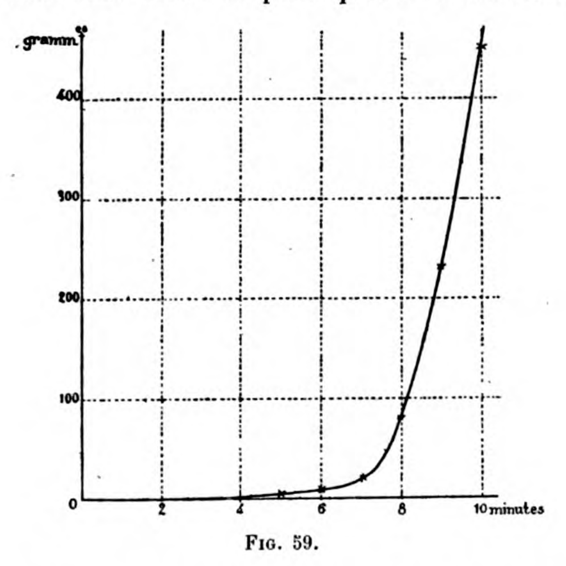


FIG. 59.

La figure 59 correspond à un ciment à prise rapide, et la figure 60 à un ciment naturel conservé dans l'air sous verre (trait pointillé) ou dans l'eau (trait plein)[3].

Les courbes de résistances, qui ont l'avantage de montrer aux yeux l'allure du durcissement d'un mélange hydrau-

[1] *Ciments et Chaux hydrauliques*, Annexe V.
[2] *Commission des Méthodes d'Essai*, t. IV, p. 130.
[3] Voir aussi les courbes « de solidification initiale » que M. Bonnami obtient avec son « aiguille d'enfoncement à poids variable ». — BONNAMI : *Fabrication et contrôle des Chaux hydrauliques et des Ciments*, p. 49. Paris, Gauthier-Villars, 1888.



lique déjà solidifié, ont été employées par la plupart des expérimentateurs qui ont soumis les chaux et ciments à des essais prolongés. Elles montrent en général que la résistance croît très rapidement pendant les premiers jours, un

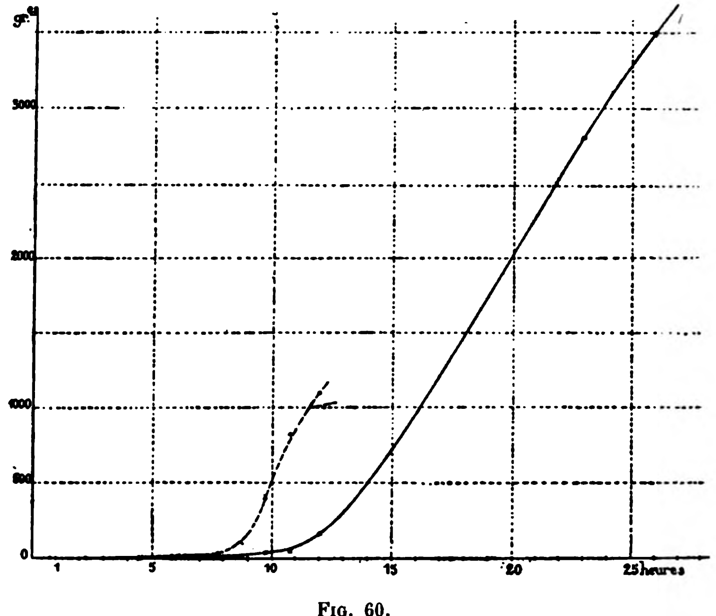


Fig. 60.

peu moins pendant les semaines qui suivent, puis de plus en plus lentement, et cela pendant plusieurs années.

Cependant, avec des liants de mauvaise qualité ou quand les mortiers sont exposés à certaines influences, il peut se produire, à partir d'une durée quelconque, des chutes plus ou moins importantes. Suivant que la cause perturbatrice, qu'elle soit interne ou externe, finit ou non par l'emporter sur l'énergie que le mortier contient en réserve, les résistances continuent à décroître jusqu'à s'annuler ou reprennent, au contraire, un nouvel essor après l'épuisement des agents de désagrégation [1].

[1] Dans les essais de traction, principalement sur briquettes immergées à l'eau de mer, il arrive souvent que les résistances du ciment gâché pur tombent brusquement après avoir atteint des valeurs très élevées, alors que celles des mortiers obtenus en additionnant de sable le même ciment continuent à



Il n'y a aucune relation fixe entre les résistances
par un même composé après des durées variables
celles par lesquelles passent deux composés différe
les mêmes durées. On ne peut donc déduire l'allur
cissement d'un produit donné de celle de produits s
et il est nécessaire, si l'on tient à connaître la succ
ses résistances, de soumettre le produit lui-mêr
essais échelonnés aussi multipliés que possible.

A fortiori n'y a-t-il aucune relation entre l'allur
cissement et celle de la prise. Souvent même les
qui atteignent en un temps très court une dureté rela
forte (prise rapide) ont, après une durée suffisamn
longée, des résistances notablement plus faibles
dont le durcissement a été plus progressif.

Une prise trop lente ou trop rapide n'implique
nécessairement un durcissement ultérieur insuffisa

Les tableaux ci-contre (pp. 346 à 348) donnent les ré
moyennes à la traction et à la compression obte
laboratoire des Ponts et Chaussées de Boulogne-
pour les principales sortes de produits essayés dans

croître régulièrement. Ces chutes doivent provenir d'un état de fragi
résultant du développement considérable que prennent les cristau
de chaux quand ils ne se trouvent pas arrêtés par des grains de sal
diquent pas, croyons-nous, que le ciment soit nécessairement de
qualité.

Du reste, de pareilles chutes de résistance ne se manifestent que
exceptionnellement dans les essais de compression.

[1] M. le Prof. W. C. Unwin a avancé que la loi de variation des
(y) d'un même mortier en fonction de ses durées de conservation
mées en semaines pouvait être représentée par la formule :

$$y = a + b\,(x - 1)^n,$$

dans laquelle a et b sont des constantes relatives à chaque ciment
et n un exposant constant pour un même genre d'essais (*Min. o*
Inst. Civ. Engineers, vol. LXXXIV, 1886, p. 399).

En cherchant à appliquer cette formule aux séries de résistance
dans les tableaux II et III (pp. 582 à 585), on constate qu'elle est
toujours bien vérifiée.

De notre côté, nous avons été amené à apercevoir une relation
possible entre la résistance et l'âge d'un même mortier (voir plus lo
Toutefois notre formule, d'ailleurs difficile à vérifier, ne nous ins
plus de confiance que la précédente, car le durcissement doit être
nomène extrêmement complexe, dont il paraît impossible de prévoir
toutes les modifications possibles.

ESSAIS DE PATES PURES
A CONSISTANCE PLASTIQUE
GACHÉES ET CONSERVÉES A L'EAU DE MER[1]

NATURE des ESSAIS	NATURE DES PRODUITS	Nombre d'échantillons distincts ayant servi pour les moyennes	RÉSISTANCE MOYENNE[2] EN KILOGRAMMES PAR CENTIMÈTRE CARRÉ APRÈS 1 semaine	4 semaines	12 semaines	26 semaines	1 an	2 ans	4 ans	8 ans
TRACTION	Chaux hydrauliques....	5	(5,6)	12,2	19,9	25,3	26,8	26,0	25,0	(23,8)
	Ciment de grappiers....	1	»	37,6	»	»	48,2	»	»	»
	Ciments rapides........	7	14,3	22,1	23,5	23,5	24,3	23,1	22,5	(28,8)
	Ciments divers[3]........	9	21,5	31,7	34,3	28,1	26,7	29,4	30,8	(38,7)
	Ciments portland.......	44	33,4	44,7	47,9	44,9	46,1	49,2	48,8	50,0
	Ciments de laitier......	11	29,1	35,3	34,9	34,5	28,8	23,1	23,5	(23,4)
COMPRESSION	Chaux hydrauliques....	4	(15)	35	72	138	165	249	269	323
	Ciments rapides........	1	81	101	138	205	165	230	238	»
	Ciments divers[3]........	5	124	171	212	249	275	359	411	(483)
	Ciments portland.......	44	194	279	340	374	432	490	578	660
	Ciments de laitier......	8	155	219	249	283	307	349	394	(378)

ESSAI D'UN PLATRE GACHÉ PUR ET CONSERVÉ A L'AIR[4]

	RÉSISTANCE, EN KILOGRAMMES PAR CENTIMÈTRE CARRÉ, APRÈS 2 jours	5 jours	1 semaine	2 semaines	4 semaines	8 semaines	12 semaines	18 semaines	26 semaines	39 semaines	1 an	2 ans	4 ans
TRACTION (moy. de 6 br.)..	15,3	13,5	13,6	12,8	13,8	23,0	21,3	19,6	19,2	24,8	28,4	23,6	24,9
COMPRESSION (moy. de 3 cub.).	65	72	65	57	64	112	119	119	98	147	131	143	138

[1], [2], [3] Voir les renvois correspondants de la page 347.

[4] A l'abri des intempéries, mais non des variations de température et d'état hygrométrique. C'est sans doute à ces variations qu'il faut attribuer le manque de régularité des résistances obtenues aux diverses périodes.

ESSAIS DE MORTIERS NORMAUX BATTUS

(1 partie en poids de chaux ou de ciment + 3 parties de sable quartzeux normal ; eau de gâchage = 10,5 à 12 pour 100 du poids des matières sèches.)

GACHÉS ET CONSERVÉS A L'EAU DE MER[1]

NATURE des ESSAIS	NATURE DES PRODUITS	Nombre d'échantillons distincts ayant servi pour les moyennes	RÉSISTANCE MOYENNE[2] EN KILOGRAMMES PAR CENTIMÈTRE CARRÉ APRÈS							
			1 semaine	4 semaines	12 semaines	26 semaines	1 an	2 ans	4 ans	6 ans
TRACTION	Chaux hydrauliques	5	(2,9)	7,8	14,6	21,5	21,5	21,2	22,1	(25,2)
	Ciment de grappiers.....	1	»	20,4	»	»	31,2	»	»	»
	Ciments rapides	7	6,2	13,6	20,6	25,2	27,4	28,0	29,3	(29,9)
	Ciments divers[3]	9	8,2	15,2	21,2	27,2	29,1	30,6	32,2	(27,2)
	Ciment portland........	44	9,5	13,7	17,8	21,3	23,9	25,9	28,0	29,7
	Ciments de laitier	11	16,1	22,9	27,9	30,5	32,5	34,0	31,2	(30,8)
COMPRESSION	Chaux hydrauliques....	4	(16)	25	50	84	107	125	152	168
	Ciments rapides........	1	66	88	108	133	143	163	148	»
	Ciments divers[3]........	5	49	65	84	103	114	151	171	(180)
	Ciments portland.......	44	60	81	98	110	123	140	164	188
	Ciments de laitier	8	88	122	151	166	185	199	222	(205)

[1] Pour les chaux, les éprouvettes ont été immergées après conservation de 7 jours à l'air humide; pour les autres produits, elles l'ont été après 24 heures toutes les fois que cela a été possible.

[2] Les essais de traction ont été faits au moyen de briquettes normales de 5 centimètres carrés de section minimum ; pour chaque échantillon et à chaque période de rupture, on a pris pour résistance la moyenne des résultats fournis par six briquettes pareilles.

Les essais de compression ont été faits au moyen de cubes de 50 centimètres carrés de section; pour chaque échantillon et à chaque période de rupture, on a pris pour résistance la moyenne des résultats fournis par trois cubes pareils ou quelquefois par deux seulement.

Les nombres donnés dans les tableaux sont les moyennes des moyennes ainsi calculées pour un certain nombre d'échantillons distincts. Mais, ceux-ci n'étant pas encore arrivés tous aux plus longues périodes, les moyennes indiquées pour 4 ans et 6 ans portent généralement sur moins de chiffres que les autres; on a mis entre parenthèses les moyennes auxquelles ont concouru moins de la moitié des échantillons essayés.

[3] Ciments de fabrication mal connue, mais devant être rangés, le plus souvent, dans la classe des ciments naturels ou dans celle des ciments mixtes proprement dits.

ESSAIS DE MORTIERS PLASTIQUES A SABLE NATUREL [1]

(1 partie en poids de chaux ou ciment + 3 parties de sable; eau de gâchage = 15 à 20 pour 100 du poids des matières sèches.)

MILIEU D'EXPOSITION [2]	NATURE des PRODUITS	NOMBRE d'échantillons distincts ayant servi pour les moyennes: traction	NOMBRE d'échantillons: compression	RÉSISTANCE MOYENNE [3] EN KILOGRAMMES PAR CENTIMÈTRE CARRÉ — TRACTION: 4 semaines	TRACTION: 12 semaines	TRACTION: 26 semaines	TRACTION: 1 an	TRACTION: 2 ans	TRACTION: 4 ans	COMPRESSION: 12 semaines	COMPRESSION: 1 an
Eau de mer	Chaux hydrauliques	8	6	4,8	10,6	13,9	16,4	18,4	19,1	22	56
	Ciment de grappiers	1	0	14,2	19,9	21,4	22,3	25,7	26,1	»	»
	Ciments rapides	5	5	7,7	13,9	17,7	21,0	24,4	25,9	39	72
	Ciments divers [4]	12	12	10,4	16,1	20,3	23,7	24,1	27,2	47	80
	Ciments portland	26	26	10,8	13,6	15,2	18,2	20,9	23,8	49	70
	Ciments de laitier	12	11	12,4	16,6	19,9	21,2	23,6	26,1	70	93
Eau douce	Chaux hydrauliques	8	6	3,8	7,2	9,8	14,4	16,4	18,0	19	49
	Ciment de grappiers	1	0	11.0	18,4	17,4	22.9	25,9	28,7	»	»
	Ciments rapides	5	5	5,7	8,8	12,4	16,1	18,5	20,1	37	74
	Ciments divers [4]	12	12	8,1	11,5	14,9	20,0	22,9	24,6	45	83
	Ciments portland	26	26	9,7	12.8	14,4	17,4	20,3	22,9	59	95
	Ciments de laitier	12	11	13,2	17,3	20,2	22,5	25,3	28,6	91	116
Air	Chaux hydrauliques	8	6	4,7	8,8	10,8	12,6	13,6	14,7	18	36
	Ciment de grappiers	1	0	12,1	18.7	20,2	21,5	26.5	27,5	»	»
	Ciments rapides	5	5	8,3	12,9	13,7	16,8	17.9	20,5	47	71
	Ciments divers [4]	12	12	8.7	12,5	15,0	19,0	21,7	24,7	54	81
	Ciments portland	26	26	11,2	14,1	13,3	18,8	24,8	28,7	61	85
	Ciments de laitier	12	11	14,2	16,9	17,8	21,1	21,4	22,4	92	111

[1] Sable de mer des environs de Boulogne contenant, en poids, environ 10 pour 100 de gros grains passant à une tôle à trous circulaires de 5 millimètres de diamètre et retenus par une tôle à trous de 2 millimètres, 25 pour 100 de grains moyens passant à la tôle de 2 millimètres et retenus par la tôle de $0^{mm},5$, et 65 pour 100 de grains fins passant à la tôle de $0^{mm},5$.

[2] Les éprouvettes conservées dans l'eau de mer ou dans l'eau douce ont été immergées après conservation de sept jours à l'air humide. Le gâchage a été fait à l'eau de mer pour les briquettes destinées à être conservées à l'eau de mer et à l'eau douce pour les deux autres séries.

[3] Mêmes observations qu'au renvoi 2 de la page précédente. Pour chaque échantillon distinct, la résistance à la compression après une même durée était la moyenne de deux cubes.

[4] Voir le renvoi 3 de la page précédente.

conditions après des durées de conservation croissant jusqu'à six ans.

On trouvera dans les tableaux II et III (pages 582 à 585) les résistances atteintes par divers produits particuliers.

On voit par ces divers tableaux que le classement des liants par ordre de résistances peut varier suivant la composition du mortier, le milieu où il est conservé, son âge au moment de l'essai et la nature de l'effort employé pour produire la rupture.

Il ne faudrait donc pas chercher à en conclure que telle catégorie de produits doit être nécessairement préférable à telle autre.

Du reste, outre que l'ordre des résistances peut varier suivant les conditions d'emploi, il est évident que la résistance mécanique n'est pas le seul point à considérer dans le choix d'un produit. Souvent même cette résistance ne joue qu'un rôle tout à fait secondaire, témoin les faibles valeurs trouvées par Vicat dans de nombreux essais faits sur des mortiers extraits de constructions romaines, qui pourtant étaient encore solides après tant de siècles. La résistance à la traction de ces mortiers a varié de 1,8 à 11,9 kilogrammes par centimètre carré, et la moyenne générale de 31 essais faits sur des mortiers provenant de monuments tels que le Pont du Gard, la Tour Magne, l'Amphithéâtre de Nîmes, etc., a donné seulement 4,32 kilogrammes.

En dehors de la résistance des mortiers, il faut tenir compte de divers autres facteurs, notamment des garanties d'inaltérabilité et de régularité qui résultent de la composition chimique et des conditions de fabrication des liants. On voit d'ailleurs que les ciments portland, qu'une longue pratique a montrés supérieurs, dans bien des cas, à la plupart des autres produits, n'occupent quelquefois que l'avant-dernier rang dans nos tableaux de résistances.

Comme exemple des diagrammes qu'on peut établir avec les données fournies par les tableaux, nous avons représenté, dans la figure 61, les variations des résistances des divers mortiers de ciment portland. On remarque qu'à la période

de vingt-six semaines (six mois) plusieurs des courbes présentent une inflexion plus ou moins prononcée.

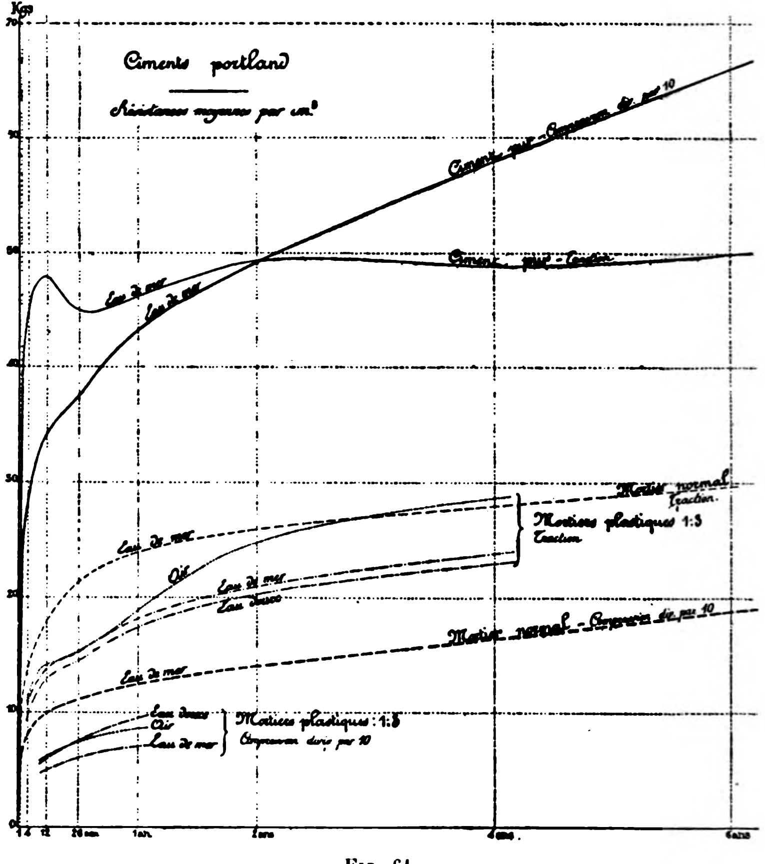


Fig. 61.

Dans cette figure, on a pris pour abscisses des longueurs proportionnelles aux durées de conservation.

Dans la figure 62, où sont comparées les résistances des diverses catégories de produits essayés à l'état de mortiers plastiques à sable naturel immergés à l'eau douce, on a pris pour abscisses les racines carrées des durées de conservation. Cette disposition, recommandable surtout dans le cas d'essais à longues périodes, a l'avantage de fournir un dessin

également clair dans toutes ses parties, sans qu'il soit nécessaire de lui donner une dimension exagérée. La zone des courtes durées, où l'étude de la variation des résistances est

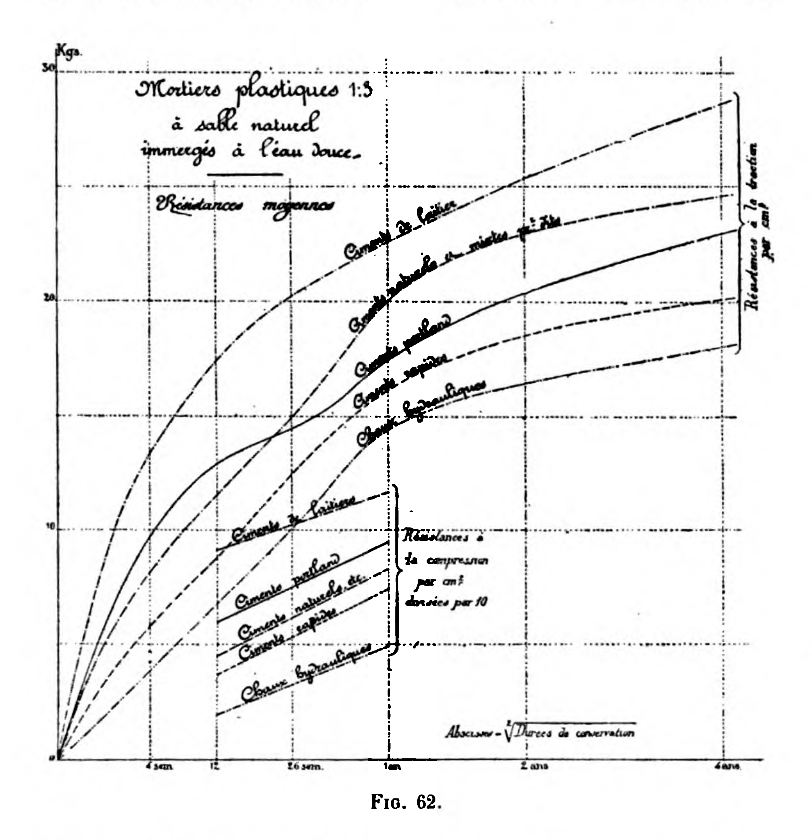


Fig. 62.

plus particulièrement intéressante, se trouve étalée par suite du plus grand écartement des abscisses, et celle des longues durées se trouve au contraire resserrée, ce qui augmente la pente des courbes dans ces régions et rend plus facilement appréciables à l'œil les faibles variations annuelles des résistances.

47. Phénomènes connexes. — En général, on observe pendant la prise et le durcissement des composés hydrauliques des phénomènes de natures diverses.

Les principaux sont les suivants :

Élévation de température. — Très faible avec les chaux hydrauliques *bien éteintes* et les ciments de laitier, l'élévation de température qui accompagne la prise peut être au contraire considérable avec certains produits vifs tels que les ciments rapides.

En règle générale, il semble qu'elle soit d'autant plus forte que la prise se produit plus brusquement. Avec les portlands de bonne qualité, la température de la petite quantité de pâte sur laquelle on fait généralement l'essai de prise ne s'élève que de quelques degrés. Mais, si l'on a affaire à de grandes masses de mortier, comme c'est le cas par exemple dans certains ouvrages de fortification, la chaleur se concentre et peut entraver les travaux. M. le Commandant Ribaucour cite notamment un exemple où l'on a constaté une différence de 46° [1].

Exsudation. — Quand on abandonne à elle-même une pâte de ciment, on observe souvent, pendant la période qui précède la prise, qu'une partie de l'eau employée pour le gâchage remonte à la surface. Il arrive d'ailleurs fréquemment, si l'on a soin de laisser cette eau, qu'elle disparaisse assez vite pendant ou après la prise, soit qu'elle se trouve vaporisée par la chaleur produite ou qu'elle soit réabsorbée pour alimenter les réactions chimiques qui s'accomplissent.

Changements de volume. — Les produits qui contiennent une proportion notable de chaux ou de magnésie mal éteintes, ou de sels jouissant comme ces matières de la propriété de foisonner au contact de l'eau, subissent généralement, pendant la prise et la période de durcissement qui la suit, une augmentation progressive de volume, qui peut être plus ou moins considérable. Il peut même se faire, surtout si le mélange n'est pas bien homogène et contient des gros grains mal éteints, que les gonflements se localisent en donnant naissance à des crevasses.

[1] *Commission des Méthodes d'Essai*, t. IV, p. 133.

L'eau chaude, en accélérant l'extinction des expansifs, accentue ces phénomènes.

Avec les ciments portland de bonne qualité, les changements de volume sont faibles ; ils peuvent d'ailleurs consister soit en contractions, soit en dilatations, suivant que les mortiers sont exposés à l'air ou dans l'eau. De nombreuses mesures ont été faites, surtout en Allemagne. Celles de M. Tomeï [1] montrent notamment que les ciments gâchés purs subissent à l'air une contraction atteignant après un an de 0,2 à 0,7 pour 100 de la longueur des barres d'essai, et, dans l'eau douce, une dilatation, qui commence par croître avec la durée d'immersion (0,01 à 0,11 pour 100 après trois mois), puis diminue et peut devenir négative. Avec les mortiers sableux, ces effets sont d'autant moins marqués que la proportion de ciment mélangée au sable est plus faible.

Dans la pratique, on peut donc considérer comme tout à fait négligeables les variations de volume des mortiers fournis par les ciments portland de bonne qualité.

Il ne s'agit d'ailleurs ici, bien entendu, que de celles qui proviennent du libre développement des réactions internes s'exerçant entre les éléments du ciment et non des gonflements incomparablement plus importants d'influences extérieures, telles qui peuvent résulter d'influences extérieures, telles par exemple que les variations de température ou les sels de l'eau de mer.

Absorption d'eau et d'acide carbonique. — Les mortiers immergés augmentent de poids d'une matière continue, mais décroissante, par suite de la pénétration lente de l'eau dans leurs pores et de la formation de dépôts carbonatés à leur surface.

A l'air, on constate d'abord une perte de poids, due à l'évaporation d'une partie de l'eau de gâchage, puis une absorption progressive d'eau et d'acide carbonique.

La nature des hydrates formés étant mal définie, on ne sait à quelle température ils perdent leur eau et, par suite,

[1] *Protokoll der Verhandlungen des Vereins Deutscher Portland-Cement-Fabrikanten*, p. 137, 1894.

on n'a aucun moyen certain de distinguer par l'analyse l'eau de combinaison de l'eau simplement retenue par capillarité.

En particulier, si l'on expose un même mortier réduit en poudre soit dans une atmosphère desséchante, soit à des températures plus ou moins élevées, les pertes de poids sont variables.

De nombreuses expériences nous ont montré que la proportion d'eau *totale* retenue, après une même durée de conservation à l'air dans des conditions identiques, soit par un même poids, soit par un même volume d'une série de mortiers faits avec un même liant employé dans des conditions différentes (nature et grosseur du sable, proportions de sable et d'eau de gâchage) dépendait éminemment de la composition de chacun d'eux. Mais, en rapportant l'eau de gâchage et l'eau perdue au liant seul entrant dans chaque mortier, nous avons constaté que la seconde était une fonction linéaire de la première :

$$\text{Eau perdue} = \lambda\,(\text{eau de gâchage} - \alpha).$$

Il est donc naturel de considérer α comme représentant la proportion d'eau absorbée chimiquement par un poids 1 de liant, et de dire que l'eau évaporée constitue une fraction constante λ du restant de l'eau employée pour le gâchage, tandis que la fraction constante complémentaire $(1 - \lambda)$ est retenue par capillarité dans les pores du mortier.

Si l'on appelle c et e les volumes réels de liant et d'eau contenus dans l'unité de volume de mortier frais, e pourra être décomposé en trois parties : e_1, e_2, e_3, constituant respectivement l'eau de combinaison, l'eau retenue par capillarité et l'eau perdue après séchage, et données par les formules suivantes, dans lesquelles α' représente une nouvelle constante, produit de α par le poids spécifique du liant :

$$\left.\begin{aligned} e_1 &= \alpha' c \\ e_2 &= (1 - \lambda)(e - \alpha' c) \\ e_3 &= \lambda\,(e - \alpha' c) \end{aligned}\right\} \quad \begin{aligned} & e = e_1 + e_2 + e_3 \\ & \frac{e_2}{e_2 + e_3} = 1 - \lambda \end{aligned}$$

Les colonnes 14 à 16 du tableau I (p. 580) donnent les valeurs de λ, α et α' déduites, pour divers composés hydrauliques, de la comparaison de 29 mortiers à dosages variés faits avec quatre sables différents.

D'autres essais répétés avec un certain nombre de ciments portland nous ont montré que, pour ces produits, la valeur de λ différait généralement assez peu de 0,67, de sorte que la loi trouvée pouvait être formulée comme il suit :

Quand un mortier de ciment portland durcit à l'air :

1° Une partie de son eau, proportionnelle au poids de ciment contenu et croissante avec le temps, entre en combinaison chimique avec le ciment ;

2° Un tiers environ de l'eau en excès reste retenu par capillarité ;

3° Les deux autres tiers de cette eau s'évaporent [1].

Quant à l'absorption d'acide carbonique, elle doit être moins régulière et limitée aux régions voisines des parois libres du bloc.

48. Influences diverses. — Il est peu de phénomènes qui soient comparables à la prise et au durcissement des composés hydrauliques pour l'importance des variations subies sous les influences en apparence les plus légères. Si un même opérateur répète avec un même ciment les mêmes essais à quelques jours d'intervalle, il n'est pas rare qu'il arrive à des résultats très différents, alors même que le produit employé est parfaitement homogène, par suite de variations souvent à peine appréciables des conditions de l'expérience.

Cette mobilité est une des causes qui ont le plus entravé l'étude des composés qui nous occupent et poussé de tout temps les industriels aussi bien que les consommateurs

[1] Voir *Annales des Ponts et Chaussées*, 1892, t. II, pp. 76 à 90. D'après la colonne 14 du tableau I, il semble que la fraction $\frac{1}{3}$ convienne aussi assez bien au cas des ciments de laitier, mais doive être remplacée par $\frac{1}{5}$ pour les chaux hydrauliques et par $\frac{1}{2}$ pour les ciments à prise rapide.

à réclamer une uniformisation des méthodes adoptées pour les épreuves de réception.

Elle montre en même temps quel intérêt il y a à ce que tout compte rendu d'essais relate avec les détails les plus précis les conditions dans lesquelles les expériences ont été exécutées.

Nature du liant. — Parmi les nombreuses causes dont dépend l'allure du durcissement, il convient de réunir dans un premier groupe toutes celles qui tiennent à la nature même des liants hydrauliques.

On vient de voir comment cette allure variait d'une classe de produits à une autre.

Elle peut aussi présenter des différences très marquées pour des produits de même espèce. Enfin, elle dépend encore, pour un même composé, de son mode de fabrication et des altérations qu'il a pu subir ultérieurement.

On a vu notamment au début de ce chapitre qu'une augmentation de la finesse de mouture accélérait la prise et augmentait les résistances, surtout au début du durcissement, et que, d'autre part, une conservation plus ou moins prolongée en magasin produisait sur la prise des effets variables et tendait à affaiblir les résistances.

En particulier, des échantillons de ciment pris en divers points d'un même sac, et qui pourtant ne présentent que de faibles écarts quant aux proportions d'eau et d'acide carbonique absorbées, peuvent accuser aux essais des propriétés très différentes.

Dans le même ordre d'idées, il est évident que l'addition de composés chimiques étrangers, soit en poudre, soit en dissolution dans l'eau de gâchage, doit modifier plus ou moins les phénomènes de la prise. Par exemple, de très faibles proportions de chlorure de calcium ou de sulfate de chaux ralentissent considérablement la prise, tout en augmentant les résistances, au moins au début du durcissement, alors que des proportions un peu plus fortes peuvent produire des effets absolument opposés (voir art. 116).

Composition du mortier. — Un second groupe d'influences

comprend toutes celles qui se rattachent à la composition du mortier. En général, la prise est d'autant plus rapide et le durcissement d'autant plus énergique que le dosage est plus riche, le sable plus gros et l'eau de gâchage moins abondante. Les variations correspondantes peuvent être énormes et dépasser, dans bien des cas, celles qui résulteraient de l'emploi de liants hydrauliques de diverses natures ou de qualités très différentes. Nous reviendrons sur cette importante question dans le chapitre VI, spécialement consacré à l'étude de la composition des mortiers.

Manipulation du mortier. — Le tour de main pour la confection et l'application du mortier exerce sur son durcissement ultérieur une influence plus grande qu'on ne pourrait le croire *a priori*. Un gâchage énergique rapproche les molécules et donne un mélange de plus en plus homogène, au sein duquel les réactions de la prise doivent avoir une allure plus régulière. On constate d'ailleurs que la consistance de la pâte se modifie à mesure que le gâchage est poussé plus loin. Un malaxage prolongé peut, en outre, empêcher la production d'une première prise très rapide due à la présence dans un ciment de composés particulièrement actifs, et par ce fait retarder considérablement la prise proprement dite.

Le serrage et, *a fortiori*, le battage du mortier augmentent sa densité, en faisant refluer l'excès d'eau à sa surface, et contribuent par là à activer sa solidification. Mais, si le mortier est trop mou, il peut en résulter en même temps une séparation de ses éléments par ordre de grosseurs et de densités et, par suite, un durcissement inégal en différents points de sa masse.

Le lissage produit un effet analogue en étalant à la surface un peu d'eau chargée de ciment pur, qui, après la prise, forme un mince glacis plus sensible que le mortier sous-jacent aux changements de température et à l'action des intempéries. Par suite de la différence de dilatabilité de ces deux couches, la surface ne tarde pas à se fendiller; puis, l'humidité et la gelée aidant, les fissures augmentent et amènent la ruine de l'enduit. Aussi le lissage doit-il être proscrit de la plupart des travaux.

De même, dans la confection des éprouvettes destinées aux essais, si l'on n'a pas soin de mettre dans les moules plus de matière qu'ils n'en peuvent contenir et de gratter ensuite l'excédent après la prise, la surface libre, où l'eau ressuée a amené une pellicule de ciment pur, n'a pas la même composition que le reste du mortier[1].

Température. — De même que dans toute autre réaction chimique, la température joue un rôle important dans la prise des produits hydrauliques. Plus le ciment ou le sable, et surtout l'eau, sont chauds lors de l'emploi, plus la température ambiante est élevée pendant toute la durée de la prise, plus celle-ci se produit rapidement. Des différences de quelques degrés seulement se font sentir d'une manière très appréciable et peuvent se traduire par des écarts de plusieurs heures[2].

On peut mettre à profit cette propriété en gâchant à l'eau chaude les produits dont on veut accélérer la prise.

Inversement, la gelée ralentit ou peut même arrêter complètement la prise ; mais, dès que le dégel survient, celle-ci reprend son cours normal sans qu'il semble résulter de cet arrêt un affaiblissement sensible de la dureté finale, à condition toutefois que la prise ne fût pas trop avancée au début de la gelée, et qu'aucun effort mécanique (décintrement, mise en service, etc.) ne soit intervenu avant la prise définitive.

L'influence de la température se fait aussi sentir sur le durcissement proprement dit, quoique d'une manière moins marquée que sur la prise. Tant qu'on reste entre les limites des conditions atmosphériques ordinaires, les résistances croissent avec la température du milieu de conservation. Mais il peut en être tout autrement, par suite de l'intervention d'actions nouvelles, si l'on élève artificiellement la température au-delà de ces limites. On a remarqué notamment

[1] Avec les ciments riches en expansifs, cette différence entre les faces opposées des éprouvettes peut se manifester bien nettement par la production de fissures sur l'une des faces, l'autre restant saine, ou encore par la courbure que prend l'éprouvette par suite de l'inégale dilatation de ses parties.

[2] On a quelquefois attribué à l'électricité atmosphérique une influence analogue à celle de la température.



qu'avec certains produits, l'immersion dans l'eau chaude après la prise accélérait beaucoup le durcissement, tandis qu'avec d'autres elle produisait, au contraire, une désagrégation.

Conditions de conservation. — L'influence des conditions de conservation et des milieux ambiants n'a pas à être démontrée.

En général, la prise est plus active à l'air que sous l'eau, par suite, sans doute, de l'intervention plus directe de l'acide carbonique, de l'évaporation d'une partie de l'eau en excès et de la moindre conductibilité de l'air, qui permet au mortier de mieux conserver la chaleur développée par les réactions de la prise. Une certaine humidité est pourtant nécessaire, surtout avec les produits lents, pour faciliter, comme on l'a vu d'autre part, l'accès de l'acide carbonique, et empêcher une dessiccation trop prononcée qui pourrait occasionner, avant la prise, des retraits et des fissures nuisibles à la solidité finale du mortier. Il importe donc de protéger les mortiers encore frais du soleil et des courants d'air.

La résistance des mortiers immergés dépend, dans une certaine mesure, du temps écoulé entre le gâchage et l'immersion. Il arrive même que certains mortiers, qui se décomposeraient dans l'eau si on les y plongeait peu de temps après leur prise, s'y maintiennent en parfait état quand on a eu soin de les laisser durcir d'abord à l'air pendant un temps suffisant pour qu'il se soit formé à leur surface une petite épaisseur protectrice de carbonate de chaux.

En particulier, dans les essais de chaux hydrauliques, on constate souvent que les briquettes durcissent ou non sous l'eau, suivant la durée du séchage préalable à l'air humide[1]. Ce phénomène, qui semble en contradiction formelle avec la définition même de l'hydraulicité, provient évidemment de la présence de chaux non éteinte dans les échantillons examinés.

On a vu par le tableau de la page 348 que l'allure du

[1] La Commission des Méthodes d'Essai des Matériaux de Construction a fixé à deux jours, quatre jours ou sept jours, suivant la nature des chaux essayées,

durcissement d'un même mortier n'était pas la même dans l'eau de mer, dans l'eau douce ou dans l'air. Contrairement à ce qu'on croit généralement, les résistances à l'eau de mer ne sont pas nécessairement plus faibles que celles à l'eau douce, à condition, bien entendu, qu'il n'y ait pas de commencement de décomposition. Des essais très nombreux nous ont montré qu'en moyenne elles étaient sensiblement les mêmes. Toutefois, les éprouvettes étaient conservées au laboratoire dans des bacs où l'eau de mer était renouvelée une ou deux fois par semaine, et rien ne prouve que les résultats auraient été semblables si l'immersion avait eu lieu dans la mer même[1].

Quant aux mortiers conservés à l'air, leurs résistances, généralement un peu plus fortes que s'ils étaient immergés, croissent d'une manière beaucoup moins régulière, par suite, sans doute, de la difficulté de maintenir l'air dans un état constant de température et d'humidité.

La résistance trouvée dépend d'ailleurs de l'état physique du mortier au moment de l'essai, ainsi que nous l'avons vérifié maintes fois en rompant des éprouvettes conservées à l'air dans des conditions identiques, mais exposées, quelques heures avant la rupture, dans des atmosphères plus ou moins humides ou même dans l'eau. Les résistances obtenues pour un même mortier ont été d'autant plus fortes qu'il retenait moins d'eau dans ses pores.

FORME DES BLOCS. — Enfin l'allure du durcissement dépend encore dans une certaine mesure de la forme et des dimensions des blocs, qui, s'ils ne sont pas pareils, ne se laissent pas pénétrer de la même manière par le milieu au sein duquel ils sont conservés. Pourtant, la plus grande part des écarts parfois considérables que l'on observe lors

la durée pendant laquelle on doit conserver les briquettes à l'air saturé d'humidité, avant de les immerger.

Pour les ciments, cette durée a été fixée à vingt-quatre heures.

[1] Depuis six mois, une nouvelle installation nous permet d'exposer des briquettes dans la mer même, de telle sorte qu'elles soient à volonté continuellement immergées ou soumises aux alternatives de la marée. Jusqu'à présent, on n'a pas constaté d'écarts de résistance bien marqués avec les briquettes conservées dans les bacs d'eau de mer du laboratoire.



des essais de rupture d'éprouvettes de types divers est plus apparente que réelle et provient, ainsi que nous l'expliquerons plus loin, de différences dans le mode de répartition des efforts exercés pendant l'essai.

§ 3. — Propriétés générales des mortiers en œuvre

49. Densité. — Suivant la nature et les proportions des éléments entrant dans un mortier, il reste plus ou moins d'intervalle entre les grains solides qui en constituent la charpente, et, par suite, sa densité peut varier entre des limites assez étendues. Même en ne considérant que des mortiers plastiques obtenus avec des sables débarrassés de tous les gros grains de plus de 5 millimètres, on trouve qu'à l'état frais leur poids peut varier entre 1.750 et 2.300 kilogrammes par mètre cube. *A fortiori*, des mortiers peu mouillés et damés ou contenant de petits cailloux peuvent-ils dépasser cette dernière limite. Enfin, pour les bétons, mélanges de mortier et de cailloux, la densité est encore plus grande.

Quelle que soit la nature du composé, sa densité varie avec le temps par suite du gain progressif d'acide carbonique, de la perte, dans certains cas, d'éléments solubles et, soit du départ d'une partie de l'eau introduite lors du gâchage, soit, au contraire, de l'absorption de nouvelle eau.

Cette variation dépend d'ailleurs des conditions d'exposition, de la composition du mélange, de la forme et des dimensions des blocs, etc. En particulier, on a vu à l'article 47 que, suivant que les mortiers étaient immergés ou à l'air, on constatait, à partir de la prise, soit une augmentation de poids continue mais décroissante, soit une diminution suivie d'une augmentation.

50. Compacité et composition volumétrique élémentaire. — Des mortiers de même densité peuvent être néanmoins plus ou moins compacts, c'est-à-dire conte-

nir réellement, par unité de volume, des volumes absolus de matières solides notablement différents.

On peut s'en rendre compte facilement, au moins pour les mortiers frais, en calculant les poids des divers éléments entrant dans un volume connu de mortier et divisant ces nombres par les poids spécifiques de ces matières.

Si c, s et e sont les volumes absolus ainsi calculés pour le ciment, le sable et l'eau contenus dans un volume 1 de mortier frais, on en conclut que le volume des vides v restant entre ces matières est mesuré par $1 - (c + s + e)$.

Dans un mémoire récent[1], nous avons montré que la connaissance des volumes c, s, e, v permettait, jusqu'à un certain point, de prévoir les principales qualités des mortiers, et nous avons appelé *compacité* d'un mortier l'état général défini par un système quelconque de valeurs de ces quatre paramètres.

Cette désignation ayant, dans la suite, soulevé diverses objections, nous l'avons remplacée par la formule plus longue mais plus rigoureuse : *composition volumétrique élémentaire*, que nous emploierons désormais, réservant le mot *compacité* pour exprimer le volume absolu des matières solides contenu dans l'unité de volume d'un mortier.

On conçoit que cet élément, qui, dans un mortier frais, est mesuré par la somme $c + s$, doive être un facteur important de la qualité des mortiers. Pourtant, il est évident qu'il n'est pas le seul à considérer et que le critérium d'un bon mortier, abstraction faite, bien entendu, de la nature et de la qualité du liant, doit être une fonction plus ou moins complexe, différant d'ailleurs suivant les aptitudes spéciales dont le mortier aura surtout à faire preuve, des volumes occupés par les divers éléments dans le mortier durci, volumes qui sont eux-mêmes des fonctions des volumes élémentaires c, s, e, v du mortier frais.

On verra plus loin comment certaines qualités des mortiers sont liées à ces quatre paramètres.

[1] *Sur la Compacité des mortiers hydrauliques.* — *Annales des Ponts et Chaussées*, 1892, t. II, pp. 1 à 164.

Dans ce paragraphe, nous nous contenterons d'énumérer les propriétés générales des mortiers en œuvre, nous réservant d'indiquer, dans le chapitre VI, comment elles varient suivant la composition des mélanges.

51. Porosité et perméabilité. — Dans son *Rapport général à la Commission des Méthodes d'Essai des Matériaux de Construction* [1], M. Alexandre définit ainsi ces deux qualités :

« Comme pour les autres corps solides, la *porosité* est, pour les mortiers, la propriété qu'ils possèdent de présenter des vides, des pores, qui peuvent être remplis de gaz ou de liquides.

On pensait autrefois que la porosité des mortiers était liée à leur *perméabilité*, c'est-à-dire à la propriété de se laisser traverser par les fluides, et l'on confondait généralement, dans le langage courant, l'une et l'autre de ces deux propriétés.

Il est reconnu aujourd'hui qu'elles sont bien indépendantes l'une de l'autre, et même que, pour un dosage déterminé de ciment, les mortiers les plus poreux, comme ceux confectionnés avec un sable très fin, sont les moins perméables, alors qu'au contraire les mortiers de gros sables, qui sont les moins poreux, sont les plus perméables. »

Si l'on plonge dans l'eau un bloc de mortier de compacité connue, jusqu'à ce qu'il se soit complètement imbibé [2], et que, le retirant ensuite, on le laisse égoutter jusqu'à ce qu'il n'en sorte plus d'eau, mais en évitant toute évaporation, le volume de l'eau retenue par un volume 1 du mortier, y compris celle qui s'y trouvait déjà avant l'immersion à l'état d'eau d'imbibition et d'eau hygrométrique, doit être considéré comme mesurant pratiquement sa porosité [3]. On pourrait

[1] Tome I, p. 308, 1895.

[2] Le moyen le plus sûr et le plus rapide d'arriver à ce résultat est de tremper seulement la base du bloc dans l'eau : celle-ci monte par capillarité et aucun obstacle ne s'oppose à l'échappement de l'air.

[3] Nous croyons que cette définition doit être préférée à celle de M. Alexandre qui, dans les commentaires dont il fait suivre le passage qui vient d'être cité, appelle *porosité* le volume total des intervalles grands et petits, c'est-à-dire, en

donc définir exactement cette qualité en précisant les conditions dans lesquelles l'expérience doit être exécutée (forme et dimension du bloc, mode d'égouttage, etc.).

Quant à la perméabilité pour un fluide donné, on peut la définir par le volume de ce fluide qui, dans des conditions déterminées, traverse, pendant l'unité de temps, un bloc de mortier de forme et de dimensions bien définies.

En somme, la porosité et la perméabilité sont les propriétés qu'a le mortier de *retenir* et de *laisser passer* du liquide entre les grains solides dont il est composé, et ces qualités dépendent moins du volume total des intervalles restants que de leurs dimensions individuelles, que ces intervalles soient d'ailleurs remplis par de l'air ou par de l'eau.

Quand on immerge dans l'eau un mortier ayant séché à l'air pendant un temps quelconque, on constate que la quantité d'eau qu'il finit par absorber correspond très sensiblement au volume v calculé comme il a été dit à l'article précédent, augmenté du volume des vides produits par l'eau évaporée pendant le séchage. Mais, si le mortier est constitué par le mélange d'un sable à gros grains avec très peu de ciment, il contient des cavités plus ou moins larges d'où l'eau s'échappe dès qu'on sort le bloc de son bain.

Si le mortier, au lieu de durcir à l'air, est immergé peu de temps après sa prise, l'eau pénètre par capillarité dans ses pores et ne tarde pas à les remplir presque complètement. Une partie du ciment, croissante avec le temps, s'assimile la proportion d'eau nécessaire à son hydratation ; quant à la chaux mise en liberté par la décomposition du silicate tricalcique en silicate moins basique et en chaux, elle se dissout dans l'eau de porosité ; une partie cristallise à l'état d'hydrate, une autre partie se carbonate et le reste s'échappe par exosmose.

somme, le complément de ce que nous venons d'appeler *compacité* (voir aussi le rapport de MM. Alexandre, Debray et Le Chatelier sur les *Méthodes de mesure de la porosité des mortiers*, Vol. IV, p. 247).

La porosité dépend surtout de l'abondance des intervalles capillaires ou *pores*, indépendamment des intervalles plus larges ou *cavités*, qui influent surtout sur la perméabilité.

Tous les mortiers possèdent la propriété de se laisser traverser par l'eau. Mais, tandis que, pour certains, la filtration se produit presque instantanément, pour d'autres, elle est beaucoup plus lente ou même ne peut avoir lieu que si l'eau agit sous une certaine pression. C'est ainsi qu'on arrive à faire traverser même des rondelles de ciment pur en faisant le vide au-dessous d'elles.

Nous avons reconnu que le volume d'eau écoulé dans un temps donné à travers un mortier quelconque croissait à peu près proportionnellement à une certaine puissance de la hauteur de charge, l'exposant variant, suivant les mortiers, entre 2, nombre qui correspond à l'écoulement libre (principe de Torricelli), et 1, et étant d'autant plus rapproché de cette dernière limite que les intervalles entre les grains solides sont plus étroits.

La perméabilité varie, en outre, avec la composition des mortiers et leurs conditions d'emploi, et décroît, par le fait même de la filtration, par suite de l'hydratation progressive du ciment, de la carbonatation de la chaux à l'intérieur des pores et de l'obstruction de ces derniers soit par les matières solides étrangères que l'eau tient en suspension, soit, dans le cas spécial de l'eau de mer, par la magnésie précipitée. Ce phénomène, qui a reçu le nom de *colmatage*, se produit d'autant plus rapidement que la filtration est plus abondante, de sorte qu'à la longue, les différences de perméabilité tendent à se niveler. Mais il est évident qu'il ne faudrait pas généraliser cette conclusion jusqu'à ses dernières limites et en déduire, par exemple, que le choix du mortier est indifférent. Il peut arriver notamment qu'une trop forte perméabilité initiale amène un amaigrissement excessif du mortier ou même, dans le cas de l'eau de mer, une décomposition plus ou moins profonde et des crevasses, et qu'alors la filtration augmente au lieu de décroître.

Les lois de la perméabilité des matériaux de construction vis-à-vis des gaz ont fait l'objet de recherches assez nombreuses. Il semble démontré que la quantité d'air qui passe est proportionnelle à la pression, mais non à l'épaisseur, et

que le colmatage est insignifiant [1]. L'humidité amoindrit la perméabilité.

En ce qui concerne spécialement les mortiers, les expériences sont plus rares. Viard a constaté que la perméabilité des tuyaux de conduite de gaz augmentait ou diminuait suivant qu'on les conservait dans un lieu sec ou à l'humidité.

52. Dureté. — La dureté d'un mortier n'est pas bien définie et peut être exprimée par des nombres très variables suivant la manière dont on cherche à la mettre en évidence.

Vicat la mesurait par la pénétration d'un foret dans des conditions déterminées.

Actuellement, on a plutôt recours à des essais de résistance sous des charges progressivement croissantes, soit que ces charges agissent par traction sur des briquettes présentant des épaulements qui permettent de les saisir dans des griffes spéciales, par flexion sur des prismes posés sur deux appuis ou par compression sur des blocs prismatiques ou cylindriques.

On pourrait encore recourir aux mêmes genres d'efforts en les faisant agir brusquement, c'est-à-dire soumettre les mortiers à des essais de choc par traction, par flexion ou par compression.

On conçoit de même qu'on puisse opérer par cisaillement, par poinçonnage, etc.

Enfin on mesure quelquefois la quantité dont les mortiers s'usent sous le frottement d'une meule dans des conditions bien définies.

Ces divers essais, dont les principaux seront décrits dans le chapitre suivant, correspondent à des genres de duretés distincts et classent parfois les mortiers dans des ordres assez différents.

Quel que soit d'ailleurs l'effort mécanique auquel elle corresponde, la résistance dépend d'un grand nombre de facteurs, qu'on peut grouper en deux catégories distinctes,

[1] Voir notamment les deux notes présentées à la Commission des Méthodes d'Essai (2e session), par M. Somasco et par MM. Trelat et Cordeau.

suivant qu'ils sont d'ordre chimique (énergie du liant) ou physique (composition volumétrique élémentaire du mélange au moment de l'essai). Nous examinerons plus loin dans quelle mesure elle est fonction des uns et des autres.

Il est rare que le durcissement d'un mortier progresse également dans toute sa masse. Les parois du bloc, plus directement exposées aux influences extérieures, acquièrent généralement une dureté plus grande que le centre, ce qui rend particulièrement délicate la mesure de la résistance et explique en partie la discordance des résultats fournis par les divers essais.

53. Élasticité. — Soumis à des charges croissantes, les mortiers prennent presque immédiatement des déformations permanentes, qui augmentent plus vite que les efforts correspondants.

Néanmoins, les déformations totales sont encore trop faibles, lors de la rupture, pour pouvoir être appréciées autrement que par des expériences de haute précision.

La mesure des constantes élastiques de pareils corps est donc des plus délicates, et on ne doit pas s'étonner de la variété des nombres obtenus, surtout si l'on tient compte de l'influence, sans doute considérable, de l'âge et de la composition des mortiers.

Dans ces derniers temps, les recherches se sont multipliées à cause de l'intérêt que présente la connaissance des coefficients d'élasticité des mortiers pour le calcul des constructions en mortier avec ossatures métalliques.

Parmi les expériences les plus connues, on peut citer celles de Bauschinger, de Durand-Claye et de Hartig.

Les nombres trouvés par M. Durand-Claye pour les modules d'élasticité de divers mortiers de ciment varient environ de $0{,}5$ à 2×10^9.

54. Adhérence. — Une autre propriété des mortiers est d'adhérer plus ou moins fortement aux surfaces qu'ils ont pour but de réunir, mais il est évident qu'elle dépend à

la fois de la nature du mortier et de celle de la surface adjacente.

Avec les corps poreux, tels que la brique ou certaines pierres, ou même simplement rugueux, le contact peut devenir tellement intime que les ruptures provenant d'efforts accidentels (tassement des maçonneries, chocs, etc.) se produisent à travers le mortier et le corps voisin sans les séparer.

Divers essais nous ont montré que, si le corps d'adhérence reste le même, l'adhérence de mortiers de compositions différentes faits avec un même produit, loin d'être proportionnelle à la résistance propre de ces mortiers, croît en général avec la proportion de grains fins de ciment ou de chaux qu'ils contiennent, avec la finesse du sable et avec la proportion d'eau introduite lors du gâchage. Cette dernière observation explique la pratique bien connue des maçons, qui consiste à mouiller largement les surfaces à enduire. Des surfaces poreuses non mouillées absorberaient en effet une partie de l'eau du mortier et affaibliraient par là son pouvoir adhérent.

D'après Bauschinger, l'adhérence du mortier au fer peut atteindre 40 à 47 kilogrammes par centimètre carré.

55. Influence de la température. — Comme tous les corps de la nature, les mortiers et bétons de ciment ayant fait prise changent de volume par suite des variations de température. Diverses mesures ont montré que leur coefficient de dilatation était sensiblement le même que celui du fer.

Ils subissent sans altération sensible des températures élevées pouvant atteindre 300 à 400°, comme dans certaines cheminées d'usines. Ils peuvent même résister, dans les incendies, beaucoup mieux que les pièces métalliques.

Tant qu'ils ne sont pas trop poreux, ils sont également insensibles à l'action de la gelée.

Ces diverses qualités sont particulièrement précieuses et font recommander l'emploi du ciment dans un grand nombre d'applications spéciales.

Toutefois, les variations de température assez brusques pour ne pas se propager simultanément dans toute l'épais-

seur des enduits peuvent, surtout avec les ciments employés purs, occasionner des fissures provenant de l'inégalité des retraits ou des dilatations.

56. Conductibilité. — Il est probable que les mortiers sont, au même degré que les pierres, mauvais conducteurs de la chaleur.

Quant à leur résistance électrique, M. le Dr St. Lindeck[1] a trouvé qu'en temps sec elle était assez faible et croissait avec la teneur en sable (450 à 5.000 ohms pour des prismes de $0^m,10 \times 0^m,10 \times 0^m,40$).

Au contraire, quand l'air est humide, les mortiers les plus maigres absorbent plus d'eau et perdent beaucoup de leur résistance, qui peut être réduite à un vingtième de sa valeur initiale. Aussi est-il prudent, dans les canalisations électriques, de les isoler au moyen d'enduits spéciaux.

57. Influence de divesr agents chimiques. — La propriété fondamentale des produits hydrauliques ayant fait prise est de résister à l'action de l'eau ; c'est elle qui a contribué le plus à leur faire prendre l'importance qu'ils ont acquise aujourd'hui et à multiplier leurs applications.

Mais, dans un certain nombre de cas où l'eau est impure, on doit se demander, avant d'employer le ciment, si ce dernier ne sera pas attaqué par les matières qu'elle tient en dissolution ou en suspension.

Il a été déjà dit que l'acide carbonique exerçait une action favorable au durcissement des mortiers. De même, les solutions de carbonates alcalins ou d'autres sels dont les acides peuvent former avec la chaux des composés insolubles, aident généralement au durcissement et à l'imperméabilisation des maçonneries. Tels sont notamment les silicates alcalins et les fluosilicates, dont il a été déjà question dans le chapitre II.

Inversement, la plupart des acides tendent à désagréger les mortiers, surtout s'ils forment avec la chaux des sels

[1] *Elektrische Zeitschrift*, 1896, n° 12.

solubles. Pourtant, si ces acides sont suffisamment dilués ou si l'eau qui les charrie tient, en outre, en suspension des matières organiques capables de former un dépôt protecteur contre les parois du conduit, leur action peut être atténuée ou même nulle.

Le plâtre exerce sur les mortiers hydrauliques, surtout dans les endroits humides, une action particulièrement nuisible. Si, par exemple, on a fait des scellements au plâtre dans un mur en maçonnerie de chaux ou de ciment, la matière se gonfle et se ramollit, au point de tomber en bouillie.

Les alcalis et leurs chlorures n'exercent pas d'influence bien appréciable, non plus que le goudron, les huiles minérales et la plupart des matières organiques. En particulier, d'assez nombreuses observations semblent avoir établi l'innocuité complète des matières fécales [1].

Par contre, les mortiers sont attaqués par les huiles végétales, par suite de la propriété qu'ont celles-ci de saponifier la chaux. Mais cette action, sensible surtout avec les mortiers poreux, peut devenir négligeable avec des mortiers compacts dont la surface a été protégée par une carbonatation antérieure.

Indépendamment de leur action chimique, certaines eaux salines peuvent provoquer dans des mortiers poreux des désagrégations pareilles à celles que produit le froid dans les pierres gélives, quand, par suite d'alternatives d'humidité et de sécheresse, les sels qu'elles contiennent viennent à cristalliser dans les pores en augmentant de volume. Tel a été notamment le cas de parements où s'infiltraient, après les périodes de pluie, des eaux chargées de sulfate de chaux, qui s'évaporaient ensuite.

58. Action de l'eau de mer. — Parmi les sels dont la présence dans l'eau peut exercer une influence sur les

[1] *Rapport de la Sous-Commission* n° 11 *de la* 4ᵉ *Commission permanente pour l'Unification des Méthodes d'Essai des Matériaux de Construction*, 1895.



mortiers, ceux de l'eau de mer méritent une étude toute spéciale en raison de l'emploi immense que les produits hydrauliques ont, dès leur découverte, trouvé dans les travaux maritimes, et des véritables désastres qui peuvent résulter de la mauvaise qualité ou de l'application défectueuse de ces produits.

Aussi, dès l'époque où, à la suite des travaux de Vicat, ceux-ci ont commencé à prendre l'énorme développement que l'on sait, a-t-on étudié l'influence exercée sur eux par l'eau de mer et cherché les meilleurs moyens de la conjurer.

Telle fut, en particulier, l'une des principales préoccupations de Vicat, dont la plupart des publications ont pour objet la recherche de mortiers inaltérables dans l'eau de mer, ainsi que de bon nombre de ses contemporains, parmi lesquels nous citerons seulement Rivot et Chatoney, dont les travaux sont également restés classiques [1]. De nos jours, la question est loin d'avoir perdu de son intérêt et continue à faire l'objet de nombreuses études. Des accidents célèbres survenus dans divers ports, notamment à Dunkerque, à Ymuiden et à Aberdeen [2], lui ont d'ailleurs donné depuis quelques années un regain d'actualité.

Mis en contact avec l'eau de mer, le mortier ou le béton encore frais se recouvre d'une couche savonneuse sans consistance, à laquelle on a donné le nom de *laitance*, et qui, si l'on ne prend pas soin de l'enlever, empêche toute adhérence avec les matériaux voisins ou les couches suivantes.

Si l'on peut éviter une immersion immédiate, ce qui est toujours préférable, cet effet se produit d'une manière d'autant moins rapide et moins abondante que la prise est parvenue à un degré plus avancé au moment de la mise en eau.

Souvent, peu de temps après l'immersion, on constate sur les mortiers, surtout quand ils sont perméables, des croûtes

[1] *Considérations générales sur les matériaux employés dans les constructions à la mer. — Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, XLII, p. 1119; XLIII, p. 373 (1856); — *Annales des Mines*, 1856, t. I, p. 505.

[2] Pour la description des décompositions observées à Aberdeen, voir : W. Smith, *The influence of Sea-Water upon Portland-Cement Mortar and Concrete. — Min. of Proceed. Inst. Civil Engineers*, Vol. CVII (1891-1892).

blanches s'étendant à leur surface et résultant de la carbonatation de la chaux entraînée par l'eau qui les traverse. Ces dépôts, qui peuvent se produire aussi bien dans l'eau douce que dans l'eau de mer, n'indiquent pas nécessairement un commencement de désagrégation et ne doivent pas inspirer d'inquiétude. Dans le cas de l'eau de mer, ils contiennent plus ou moins de magnésie qui s'est substituée à la chaux.

Quelquefois, sur des maçonneries horizontales immergées dans une eau de mer parfaitement tranquille, on trouve des stalagmites tubulaires de même nature, hérissant la surface du mortier d'une forêt de végétations minérales et produites évidemment par l'action des sels de magnésie et de l'acide carbonique sur la surface extérieure de filets ascendants d'eau chargée de chaux.

Les premiers symptômes de la désagrégation des mortiers par l'eau de mer sont généralement de fines veines blanches serpentant à leur surface, et qui peuvent d'ailleurs, suivant la qualité du produit employé et les conditions de fabrication et d'exposition du mortier, rester stationnaires, sans être suivies de déformations plus graves, ou, au contraire, progresser jusqu'à un degré plus avancé de décomposition ou même jusqu'à la destruction complète de l'ouvrage.

Dans ce cas, les veines, d'abord fines et déliées, deviennent de plus en plus marquées et ne tardent pas à s'ouvrir, légèrement d'abord, puis en devenant de plus en plus béantes et donnant souvent passage à de nouvelles efflorescences. La paroi libre se boursoufle et se tord ; des morceaux se détachent d'eux-mêmes et mettent à nu une masse de mortier qui, si elle présente encore à la surface une certaine dureté, n'offre plus à l'intérieur que la consistance d'une bouillie épaisse, au milieu de laquelle on aperçoit une multitude de points blancs, produits de la décomposition de la chaux hydraulique ou du ciment par l'eau de mer.

En émiettant à la main un pareil mortier dans de l'eau et agitant ensuite le tout, puis laissant reposer quelques instants, on arrive à séparer, après quelques lévigations, une matière bien homogène, blanche ou présentant parfois une coloration légèrement rosée.



Nous avons donné, dans un mémoire déjà cité [1], les résultats d'analyses faites au laboratoire des Ponts et Chaussées de Boulogne-sur-Mer sur des matières ainsi extraites de mortiers plus ou moins décomposés. Il en ressort que leur composition est variable et ne correspond à aucune formule chimique bien définie. En général, plus le mortier a atteint un degré avancé de décomposition, plus on peut en extraire de matière blanche et plus celle-ci est riche en magnésie. La teneur en acide sulfurique augmente aussi, quoique d'une manière moins régulière, avec le degré de décomposition.

Au sujet de la cause chimique des décompositions produites par l'eau de mer, Vicat s'exprime comme il suit :

« Si l'on verse de l'eau de chaux dans de l'eau de mer, il s'y forme sur le champ du sulfate et du chlorhydrate de chaux, et il s'y précipite de la magnésie rendue libre ; le même fait s'observe lorsqu'on place dans de l'eau de mer, à l'état frais ou pâteux, un mortier, un ciment ou une gangue à pouzzolane ; il a lieu encore, pour les mêmes composés parvenus à un degré de cohésion très avancé, quand l'acide carbonique n'a pas agi sur leurs surfaces. L'affinité des acides sulfurique et chlorhydrique pour la chaux est donc non seulement assez puissante pour produire ces effets, mais encore pour enlever cette base à ses combinaisons avec la silice et l'alumine ; c'est ainsi que toutes les gangues à pouzzolanes, tous les ciments et toutes les chaux hydrauliques sont décomposés par les dissolutions, même très étendues, de sulfate ou de chlorhydrate de magnésie, lorsqu'on les y projette à l'état de poudres impalpables. »

Des expériences plus récentes ont montré que l'action du chlorure de magnésium était loin d'être aussi énergique que celle du sulfate de magnésie. En particulier, en faisant traverser d'une manière continue des blocs de mortier identiques par de l'eau pure, des dissolutions de chlorure de sodium, de sulfate de chaux, de chlorure de magnésium et de sulfate de magnésie, ainsi que par de l'eau de mer, nous n'avons

[1] *Annales des Ponts et Chaussées*, 1892, II, p. 93.

constaté, la plupart du temps, de désagrégations qu'avec les deux derniers liquides, quoique, avec tous, la composition du mortier ait fini par être plus ou moins altérée.

Il semble donc démontré par là que si, quelle que soit la nature du liant hydraulique employé, le mortier peut se trouver amaigri par la double décomposition qui a pour effet de remplacer par de la magnésie sans consistance une partie de la chaux qu'il contient soit à l'état libre, soit combinée avec la silice ou l'alumine, les gonflements capables d'occasionner une désagrégation sont dus surtout à la combinaison de la chaux du mortier avec l'acide sulfurique mis en liberté par le départ de la magnésie. Nous avons d'ailleurs obtenu des désagrégations analogues, presque aussi rapides qu'avec le sulfate de magnésie, en faisant traverser des mortiers identiques par des solutions de sulfate de cuivre et de sulfate de potasse telles que la quantité d'acide sulfurique entrant dans un litre de liquide fût la même dans tous les cas. La seule différence a été un colmatage notablement plus rapide des blocs traversés par le sulfate de magnésie.

Le processus mécanique de la désagrégation par l'eau de mer peut, au premier abord, paraître assez complexe. Nous avons publié des expériences dans lesquelles, suivant que les blocs étaient immergés dans une eau tranquille ou traversés par un courant continu, les désagrégations s'étaient produites pour les mortiers maigres à gros sable, présentant de larges cavités, ou, au contraire, pour les mortiers à sable fin plus poreux et peu perméables [1].

Dans d'autres expériences, dont chaque série portait sur des mortiers à dosages variables d'un même composé hydraulique et d'un même sable, les plus maigres ont été rarement les plus vite désagrégés.

Ces divers phénomènes s'expliquent parfaitement si l'on considère que les premiers fendillements ont lieu quand les composés chimiques résultant de la décomposition du ciment

[1] Pour toute cette question, voir : *Annales des Ponts et Chaussées*, 1892, II, pp. 90 à 116.

par les éléments de l'eau de mer ont acquis un volume supérieur à celui des vides du mortier et les font éclater, de même que la dilatation de l'eau qui se congèle à l'intérieur des matériaux poreux les désagrège et en occasionne rapidement la destruction.

Or, les conditions pour que ce phénomène se produise sont 1° que l'eau de mer puisse pénétrer la masse du mortier et s'y renouveler suffisamment pour en provoquer d'une manière continue la décomposition chimique, et 2° qu'à un moment donné, les produits de cette décomposition se trouvent réunis dans le mortier en quantité telle que la capacité de ses pores ou cavités ne suffise plus à les contenir.

Il n'est donc pas étonnant que, dans les essais par filtration, on n'ait observé aucune désagrégation pour les mortiers presque imperméables où l'eau se renouvelait difficilement, ni pour les mortiers très perméables dont les cavités assez larges étaient constamment débarrassées des produits de décomposition, grâce au courant assez abondant qui les traversait.

Mais, si ces derniers mortiers étaient plongés dans une eau tranquille, la majeure partie des produits formés, restant sur place, finissait par remplir leurs vides, puis par les faire éclater.

Au contraire, les mortiers moins perméables quoique très poreux, plongés dans la même eau tranquille, n'ont éprouvé aucune desagrégation à cause de la difficulté du renouvellement de l'eau retenue par capillarité dans leurs pores.

Enfin, on peut expliquer par le faible volume des produits de décomposition qui peuvent se former dans les mortiers où le sable est mélangé de très peu de liant hydraulique, la rareté des cas de fissuration observés pour ces mortiers particuliers. Mais ceux-ci n'en ont pas moins été le siège de décompositions énergiques qui ont dû affaiblir considérablement leur cohésion.

Dans la pratique, il est rare que les mortiers se trouvent immergés dans une eau de mer absolument tranquille. Si, comme il arrive presque toujours, la pression de l'eau est susceptible de variations, si faibles qu'elles soient, ou n'est

pas la même sur les deux faces des maçonneries, il tend à s'établir à travers les mortiers, quand ceux-ci ne sont pas absolument imperméables pour les plus fortes différences de pression qu'ils ont à subir, des courants soit continus, soit intermittents ou alternatifs, qui facilitent le renouvellement de l'eau au contact du ciment. Dans ce cas, l'expérience démontre d'une manière surabondante que, même à dosage égal, les mortiers se désagrègent d'autant plus rapidement que leur sable contient une plus forte proportion de grains fins, ce qui s'explique aisément par la plus grande surface d'attaque offerte par le ciment à l'eau de mer, en raison de son état de division.

On en jugera par le tableau ci-contre, relatif à des blocs cubiques de 7 centimètres de côté fabriqués avec un même ciment et dans des conditions identiques sauf en ce qui concerne la composition du sable, et soumis, après durcissement préalable de onze jours, à une filtration continue d'eau de mer sous une pression de 2 mètres.

On voit en particulier que même des mortiers contenant en poids une partie de ciment pour 1,7 de sable fin, soit environ 800 kilogrammes par mètre cube, ont commencé à se désagréger après quelques semaines, alors que des mortiers à 1 du même ciment pour 4,1 de sables moyens ou gros, c'est-à-dire composés en moyenne d'environ 350 kilogrammes de ciment par mètre cube de sable, sont encore intacts après plusieurs années d'expérience.

Ces observations expliquent les mécomptes éprouvés dans divers travaux exécutés avec des mortiers de sable fin, tel que celui qu'on trouve dans les dunes.

En général, dans les mers à marée, on constate les fissures les plus abondantes et les décompositions les plus actives dans les parties des ouvrages qui se trouvent à peu près au niveau moyen de la mer, sans doute parce que cette cote correspond à la fois à d'assez longues durées d'immersion et d'émersion. Toutefois, il peut en être autrement suivant la disposition des ouvrages et une foule de conditions locales. En tous cas, même dans les maçonneries les plus décomposées, il arrive souvent que les parties inférieures à une certaine cote paraissent encore bien saines.

COMPOSITION DES MORTIERS [1]	PROPORTIONS [1] DES ÉLÉMENTS				VOLUME D'EAU (en centimètres cubes) filtrant par heure			ÉPOQUE DE L'APPARITION des premières veines	ÉTAT DES MORTIERS APRÈS 7 ANS DE FILTRATION CONTINUE les cubes trempant dans l'eau de mer	OBSERVATIONS
	Ciment	Gros sable	Sable moyen	Sable fin	au début de l'expérience	après 3 ans	après 7 ans			
1 ciment + 5 sable	1	0	0	5	13,2	0,5	0,3	3 jours	Cubes tombés en morceaux. — Il n'en reste plus qu'un noyau sphérique.	
	1	0	1	4	4,2	0,2	0,2	1 semaine		
	1	1	0	4	11,4	0,2	0,2	1 semaine		
	1	0	2	3	4,5	3,7	1,2	1 semaine		
	1	1	1	3	(?)	0,1	0,1	2 semaines		
	1	2	0	3	4,9	0,2	0,2	2 semaines	Fissures profondes.	La plupart de ces mortiers se trouvaient déjà, au bout de deux à trois mois, dans un état très voisin de celui qu'ils présentent après 7 ans.
	1	0	3	2	2.1	0,2	0,1	2 semaines	Veines lég. ouv., puis colmatées.	
	1	1	2	2	2,1	0,1	0,1	2 semaines	Veines légèrement ouvertes.	
	1	2	1	2	3,4	< 0,1	< 0,1	3 semaines	Veines non ouvertes.	
	1	3	0	2	0,1	0	0	Néant	Intact.	
	1	0	4	1	2,8	0,2	0,2	3 semaines	Veines très légèrement ouvertes, puis colmatées.	
	1	1	3	1	5,5	0,1	0	4 semaines		
	1	2	2	1	8,5	0,2	0,1	3 semaines		
	1	3	1	1	1,8	0,4	< 0,1	26 mois		
	1	4	0	1	5,0	< 0,1	< 0,1	Néant	Intacts.	
	1	0	5	0	6300	0,5	0,5	Néant		Tant que les six derniers cubes sont restés très perméables, on a été obligé de restreindre artificiellement leur écoulement.
	1	1	4	0	8640	0.3	0,2	Néant		
	1	2	3	0	26100	0,5	0,4	Néant		
	1	3	2	0	66600	2,0	1,1	Néant		
	1	4	1	0	117600	5,1	0,7	Néant		
	1	5	0	0	256800	43400	7000	Néant		Ecoulement encore restreint
2 ciment + 4 sable	2	0	0	4	2,5	0	0	3 semaines	Veines non ouvertes.	Au bout de 2 ans, ces cubes, qui ne laissaient plus filtrer d'eau depuis déjà assez longtemps, ont été enlevés de l'appareil à filtration et simplement immergés dans l'eau de mer.
	2	0	1	3	1,4	0	0	Néant	Intacts.	
	2	1	0	3	1,1	0	0	Néant		
	2	0	2	2	2,4	0	0	6 semaines	Veines non ouvertes.	
	2	1	1	2	0	0	0	Néant	Intacts.	
	2	etc.			< 1,6	0	0	Néant		
Plus de $\frac{2}{6}$ de cim.	divers dosages				0	0	0	Néant	Intacts.	

(1) Ces proportions sont exprimées en volumes absolus (quotient du poids par le poids spécifique), de sorte que les mortiers du premier groupe contiennent en poids 5 × 2,65 de sable pour 1 × 3,15 de ciment, soit 4,2 pour 1. et ceux du second groupe 4 × 2,65 pour 2 × 3,15, soit 1,7 pour 1.

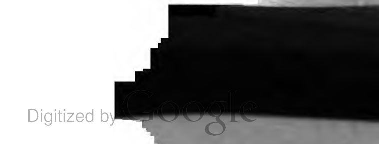
Il y a d'ailleurs à tenir compte, en dehors des phénomènes de décomposition par filtration, des désagrégations qui sont dues à l'évaporation de l'eau restée dans les mortiers pendant les intervalles de marée basse.

Il résulte de ce qui précède qu'avec les composés hydrauliques actuellement connus, le seul moyen d'éviter les décompositions est d'empêcher l'eau de mer de pénétrer dans les mortiers. Cet effet ne peut d'ailleurs être obtenu que de deux manières, soit au moyen d'enduits protecteurs naturels ou artificiels, soit grâce à l'étanchéité propre des mortiers.

Abstraction faite des enduits formés par les silicates ou les fluosilicates alcalins, que leur prix élevé et le manque de données précises sur le rôle qu'ils pourraient jouer a fait jusqu'à présent laisser de côté dans les travaux maritimes, le plus efficace est sans contredit le carbonate de chaux qui se produit spontanément à la surface des mortiers abandonnés à l'air humide. Aussi doit-on recommander de n'immerger ceux-ci que le plus tard possible. On a aussi beaucoup vanté de tout temps l'influence bienfaisante des sécrétions animales et végétales qui, en peu de temps, forment une épaisse croûte à la surface des maçonneries. Enfin, on revêt parfois l'une ou l'autre face des ouvrages de chapes en mortier riche ou en asphalte, de parements de pierres de taille soigneusement jointoyés ou de corrois d'argile.

En admettant même que ces diverses couches protectrices soient parfaitement étanches, elles n'offriraient jamais qu'une sécurité fort précaire, si le mortier ou le béton qu'elles recouvrent n'était pas en état de résister par lui-même, en raison de sa propre compacité, à la pénétration de l'eau. Il suffirait en effet d'une solution de continuité produite accidentellement dans l'enduit, pour que l'eau de mer y trouve un passage et propage par là de proche en proche ses ravages jusqu'au cœur de la maçonnerie.

Le seul moyen réellement efficace de lutter contre son action réside donc dans l'emploi de mortiers aussi compacts que possible, et par suite, ainsi qu'on le verra au chapitre VI,



plus encore dans le choix judicieux du sable et du dosage que dans celui du composé hydraulique, pourvu bien entendu que ce dernier ne renferme aucun principe expansif capable d'en amener la destruction, même à l'abri de l'eau de mer.

On n'a encore aujourd'hui que des données assez incertaines sur le plus ou moins d'aptitude qu'ont les diverses sortes de produits hydrauliques à résister à l'action décomposante de l'eau de mer. On a même cru constater que, suivant les mers, il y avait lieu de donner la préférence à tels ou tels d'entre eux ; mais cette opinion, qu'on a cherché à justifier par l'amplitude variable des marées, par les différences de salure et d'acide carbonique dissous et par des inégalités de température, de courants, d'apports vaseux ou de dépôts animaux et végétaux, nous paraît insuffisamment établie, en raison surtout de la variabilité simultanée des modes d'emploi.

Certes, il semble démontré par la pratique que le bon ciment portland résiste généralement mieux que les autres produits connus antérieurement ; mais il ne faudrait pas croire pour cela qu'il soit à l'abri de toute décomposition, et c'est en partie à la confiance exagérée qu'on a eue longtemps en ses qualités spéciales qu'il faut attribuer bon nombre des accidents qui se sont produits.

Quant aux ciments de laitier, dont l'invention est relativement récente, ils n'ont pas encore fait leurs preuves par un usage suffisamment prolongé pour qu'on puisse se prononcer sur leur compte.

CHAPITRE V

ESSAIS

§ 1. — Généralités [1]

59. Expériences de recherches. — Parmi les divers genres d'essais qu'on fait subir aux produits hydrauliques ou aux mélanges dans lesquels ils entrent, certains, qu'on peut désigner sous le nom générique d'*expériences de recherches*, ont pour but de fournir des indications d'un caractère général, soit qu'il s'agisse de fixer la meilleure composition de ces produits et de ces mélanges, ou de mettre leurs propriétés en évidence.

Les recherches, basées avant tout sur l'observation judicieuse des phénomènes, procèdent généralement par comparaison des résultats fournis par des expériences dans lesquelles toutes les données restent les mêmes à l'exception d'une seule, dont on se propose d'étudier l'influence. On ne peut en tirer de conclusions générales que si chaque groupe d'expériences a été répété dans des conditions variées, choisies de manière à embrasser tous les cas possibles, et a toujours donné des résultats concordants. Quant à l'interprétation scientifique de ces résultats purement empiriques, elle

[1] Des considérations du même genre, quoique ayant des tendances souvent différentes de celles-ci, ont été longuement développées par M. Le Chatelier dans son mémoire sur les *Procédés d'essai des Matériaux hydrauliques.* — *Annales des Mines*, septembre-octobre 1893.

n'apparaît pas toujours d'une manière immédiate et exige souvent de nouvelles recherches spéciales.

Les méthodes à suivre doivent donc être abandonnées à l'imagination et à la sagacité des expérimentateurs, et il serait absurde de prétendre les limiter ou les réglementer.

C'est là une erreur dans laquelle sont tombés bon nombre de praticiens qui, sous prétexte de rendre comparables entre elles les expériences poursuivies dans divers laboratoires, ce qui, au point de vue des recherches pures dont il s'agit ici, n'a qu'une utilité fort discutable, se sont astreints à n'appliquer en pareils cas que les méthodes normales fixées pour les essais de réception, sans s'inquiéter si les nombres qu'on en déduit sont un critérium suffisant de la qualité réelle des produits.

Les premières recherches ont porté naturellement sur la fabrication des composés hydrauliques, soit qu'il s'agît de fixer la meilleure composition chimique des matières crues, le meilleur degré de cuisson ou de mouture, etc. Tel a été notamment l'objet presque constant des travaux de Vicat en France, de Pasley en Angleterre et de tant d'autres expérimentateurs qui depuis se sont occupés de perfectionner la fabrication.

A partir du moment où l'industrie, solidement assise, a fourni des produits à peu près constants pouvant se rattacher à un petit nombre de types distincts, le but principal des recherches a été de faire connaître d'une manière de plus en plus approfondie les propriétés de ces produits, en étudiant la nature et les causes des phénomènes auxquels ils donnaient lieu à l'emploi et la manière dont ces phénomènes se trouvaient modifiés selon les diverses influences pouvant intervenir. Les expériences de ce genre se sont particulièrement multipliées depuis vingt à trente ans. Parmi les auteurs qui ont été les premiers à s'en occuper, nous nous bornerons à citer MM. Grant en Angleterre, Leblanc et Barreau en France, Michaëlis et Dyckerhoff en Allemagne.

Enfin, on peut classer dans une troisième catégorie toutes

les recherches tendant à déterminer les meilleures conditions d'emploi des divers matériaux qui peuvent entrer dans la composition des mélanges hydrauliques. Le plus souvent, les expériences sont entreprises par des ingénieurs, au début de travaux importants, et ne visent guère que les matériaux particuliers qu'ils ont à leur portée. Dans ce cas, on n'est pas en droit d'en tirer des conclusions générales, erreur qui explique souvent la discordance de résultats obtenus sur divers chantiers.

60. Essais proprement dits. — Contrairement aux expériences ayant une portée générale et scientifique, les *essais* proprement dits ne visent pas plus haut que de déterminer la qualité marchande ou la nature d'échantillons particuliers. Appliqués la plupart du temps soit par les producteurs au contrôle courant de leur fabrication, soit par les consommateurs à la réception des produits fournis par le commerce, ils doivent être simples, à la portée de tout le monde et définis d'une manière suffisamment précise pour échapper à toute contestation.

Les méthodes à employer devraient toujours reposer sur des données rigoureusement scientifiques, de manière que les essais renseignassent sur la qualité réelle des produits (*essais de qualité*). Malheureusement, en l'état actuel de nos connaissances, il est rarement possible de leur donner une base aussi positive : on est alors réduit à diriger les essais de manière à chercher si l'échantillon ressemble plus ou moins à tel ou tel produit connu ayant déjà fait ses preuves dans la pratique (*essais d'identification*); on soumet une fois pour toutes le produit type à une série d'essais faciles à définir exactement et à exécuter dans des conditions toujours identiques (*essais normaux*) ; puis on compare aux résultats obtenus ceux que donnent, après les mêmes essais, les divers échantillons à examiner. Aussi importe-t-il au plus haut point, pour qu'il soit possible de rapprocher ainsi les chiffres trouvés dans tous les laboratoires, que les méthodes adoptées soient partout les mêmes.

Il n'est d'ailleurs pas indispensable que les essais nor-

maux d'identification correspondent à des propriétés devant se manifester à l'emploi, pourvu qu'ils permettent de classer exactement les produits et qu'on ne se méprenne pas sur leur portée, au point de prétendre déduire des chiffres qu'ils fournissent des indications précises sur la manière dont chaque produit se comportera dans la pratique.

Il y a une vingtaine d'années, quelques grandes administrations seulement soumettaient les ciments à des épreuves de réception, différant de l'une à l'autre et généralement assez sommaires.

Un des premiers pas vers l'unification paraît avoir été fait par l'Association des Fabricants allemands, qui fit adopter officiellement en 1878 par le Ministre des Travaux Publics de Prusse, un ensemble de préceptes ou *normes*, pour la livraison et l'essai uniforme des ciments portland. Ces normes ne tardèrent pas à être adoptées, sauf de très légers changements, en Autriche (1880), en Russie, en Danemark (1881) et en Suisse (1883). Elles furent révisées en 1886 [1].

En 1885, en même temps qu'un Comité nommé par l'Association américaine des Ingénieurs civils présentait à cette Société un rapport sur un système uniforme d'essais des ciments [2], parut en France le nouveau *Cahier des charges des Fournitures de Ciment pour les ports de Boulogne et de Calais*, œuvre de MM. Guillain et Vétillart, qui se généralisa peu à peu et servit de base à la plupart des cahiers de charges adoptés ultérieurement par les autres administrations françaises [3].

Cependant, un mouvement d'opinion s'étant manifesté, lors

[1] Les normes revisées sont reproduites littéralement dans l'ouvrage : *Der Portland-Cement und seine Anwendungen im Bauwesen*, Berlin, 1892, et ont été traduites ou résumées dans diverses publications françaises, notamment dans le numéro de février 1888 de la *Revue du Génie militaire*.

Le volume de M. C. Schoch : *Die moderne Aufbereitung und Wertung der Mörtelmaterialien*, Berlin, 1896, résume les règles normales adoptées dans les principaux États.

[2] *Transactions of the Amer. Soc. of Civ. Eng*, Vol. XIV, novembre 1895, p. 475.

[3] Il n'existe pas dans le commerce d'exemplaires de ce cahier des charges, mais il a été reproduit dans diverses publications, notamment dans l'article de la *Revue du Génie* déjà cité, et dans l'ouvrage de M. Candlot : *Ciments et Chaux hydrauliques*, p. 150.

des congrès qui eurent lieu pendant l'exposition de 1889, en faveur de l'unification des méthodes d'essai des différents matériaux de construction, une grande commission officielle française fut nommée en 1891, sous la présidence de M. le Conseiller d'État A. Picard, assisté de M. P. Debray comme secrétaire général, en vue d'étudier cette importante question. A la suite d'une première session, close en 1893, et pendant laquelle furent soumises à un examen approfondi non seulement les diverses méthodes d'essai connues, mais encore un certain nombre de nouveaux dispositifs expérimentaux imaginés au cours de recherches entreprises, la Commission publia le compte rendu de ses travaux [1].

Dans la section chargée plus spécialement de l'étude des chaux et ciments, les débats furent, durant cette session, présidés par M. l'Inspecteur Général Guillemain, assisté de MM. Ch. Garnier, Durand-Claye et Brüll comme vice-présidents, et il fut produit 31 rapports particuliers, formant le 4e volume de la publication, et un rapport général, inséré dans le premier volume, dans lequel M. l'Ingénieur en Chef Alexandre aborde la question dans son ensemble et résume les conclusions adoptées.

Il s'est écoulé trop peu de temps depuis la publication de ces travaux pour que toutes les nouvelles règles soient encore passées dans la pratique courante. Il convient d'ailleurs d'attendre que l'unification soit devenue internationale, résultat qui ne saura tarder d'être atteint, étant donné les efforts faits également à l'étranger dans le même but.

En 1884, un premier congrès, absolument libre et privé, fut convoqué à Munich sur l'iniative du savant bavarois Bauschinger ; il fut suivi de plusieurs autres, qui furent tenus successivement à Dresde (1886), Berlin (1890), Vienne (1892) et Zurich (1895) [2], et qui, prenant un caractère de plus en

[1] Rothschild, éditeur. Paris, 1894-1895, 4 vol. in-4°.

[2] Les conclusions adoptées à ces conférences ont été publiées en langue allemande chez l'éditeur Th. Ackermann, de Munich, et résumées dans diverses publications françaises. Voir notamment les *Comptes Rendus de la Société des Ingénieurs civils*, bulletin de février 1891. En 1896, s'est fondé un journal : *les Matériaux de Construction*, édité à Stuttgart, qui est l'organe officiel de l'Association internationale pour l'essai des matériaux.

plus international, doivent se continuer à Stockholm en 1897 et à Paris en 1900. Ces conférences ont produit de leur côté des résultats très importants, et il a été décidé depuis peu qu'une commission internationale serait nommée en vue de comparer les conclusions formulées de part et d'autre, de manière à préparer l'unification générale.

61. Contrôle à l'usine. — On vient de voir que les essais normaux établis en vue de la réception des composés hydrauliques présentaient parfois une certaine incertitude et n'avaient souvent d'autre portée réelle que de montrer si l'échantillon étudié correspondait ou non, comme nature et comme qualité, à un certain type bien défini.

Dans quelques cahiers de charges, et notamment dans celui de Boulogne et de Calais qui a donné l'exemple, on a établi une distinction entre les essais fondamentaux, dont l'insuccès fait rebuter définitivement la fourniture, et d'autres essais moins décisifs, entraînant seulement la suspicion du produit et l'ajournement de sa réception jusqu'à l'issue de nouveaux essais plus prolongés.

En outre, l'Administration a jugé que les diverses épreuves de réception des portlands livrés, tout en fournissant de sérieuses garanties, étaient néanmoins impropres à renseigner d'une manière suffisamment certaine sur la qualité de ces produits; elle n'a accepté aux adjudications que les usines reconnues capables, à la suite d'une visite minutieuse et d'essais plus ou moins prolongés, de fournir régulièrement et en quantités suffisantes pour les besoins de l'État des produits inspirant confiance, et elle a imposé aux fournisseurs un contrôle continu de la fabrication dans leur usine.

Un pareil contrôle doit être exercé discrètement et se borner à signaler les produits qu'il y a lieu de considérer comme suspects. Dans ces conditions, il ne peut gêner un industriel honnête et il garantit au consommateur la sincérité des procédés de fabrication. En outre, il présente l'avantage de faire connaître la genèse des ciments employés dans les grands travaux, ce qui plus tard, quand une longue pratique aura montré la manière dont ils se seront comportés,

pourra fournir un guide précieux sur la direction à donner à la fabrication.

Mais il est évident que le contrôle n'est pas à la portée de tous les consommateurs de ciment et que seules les grandes administrations, et en particulier l'État, peuvent y recourir.

Jusqu'à présent, il a été appliqué en France par le service des Ponts et Chaussées, par la Ville de Paris et par le Génie militaire, et un peu aussi à l'étranger, notamment par le Génie militaire belge. Les principales opérations consistent à vérifier la constance de la composition chimique des mélanges crus, à surveiller le triage des matières extraites des fours et à suivre dans l'usine le ciment dit *administratif* jusqu'aux magasins spéciaux où il est conservé. Il est pratiqué par des agents établis à poste fixe dans les usines par les administrations intéressées, sous la direction d'un agent supérieur qui y fait de fréquentes tournées et prélève des échantillons de matières crues ou cuites, qui sont ensuite analysés ou essayés dans des laboratoires spéciaux.

Tel est le but fondamental des deux laboratoires institués à Boulogne-sur-Mer sur des bases identiques par l'Administration des Travaux Publics et par celle de la Guerre.

62. Méthodes d'essai en général. — Vu le caractère éminemment personnel et variable des méthodes suivies pour les *expériences de recherches*, on ne peut songer à les décrire ou à les énumérer. Aussi nous bornerons-nous, dans ce qui suit, à l'examen des dispositifs généralement adoptés pour les *essais proprement dits*.

Les divers travaux qui ont été publiés par la Commission des Méthodes d'Essai des Matériaux de Construction, et en particulier le rapport général de M. Alexandre, ont décri minutieusement la plupart des méthodes proposées ou appliquées dans chaque cas, et pesé leurs mérites respectifs.

Nous passerons donc rapidement une revue plutôt critique que descriptive des principales d'entre elles, renvoyant le lecteur à cet important ouvrage pour tous les détails complémentaires.

Le nombre des essais prévus est considérable, car la

Commission a cru devoir examiner tous ceux auxquels elle a reconnu quelque intérêt, et indiquer pour chacun la méthode qui lui paraissait la plus convenable, sans toutefois vouloir se prononcer sur le plus ou moins d'utilité de chaque essai dans les divers cas qui peuvent se présenter, ni fixer les résultats numériques qu'on doit en attendre suivant la nature et la qualité des échantillons.

Beaucoup sont loin d'être d'une application pratique et ne peuvent être exécutés que dans des laboratoires spécialement outillés, comme le sont, outre les deux laboratoires de contrôle qui viennent d'être cités, le laboratoire de l'École nationale des Ponts et Chaussées, celui du service des Travaux de la Ville de Paris, les laboratoires officiels étrangers de Zurich, Berlin-Charlottembourg, Malines, Saint-Pétersbourg, Munich, Vienne, etc., et quelques laboratoires d'usines ou d'ingénieurs-conseils spécialistes.

Tous ces essais ne sont pas également utiles; plusieurs peuvent parfois faire double emploi avec d'autres, et, dans la plupart des cas, quelques-uns seulement suffisent à renseigner sur les principales qualités des produits.

La multiplicité des essais possibles ne saurait donc décourager même les laboratoires les plus modestes.

Mais, si l'on peut sans crainte restreindre le nombre des épreuves, il importe d'appliquer les méthodes telles qu'elles ont été définies, sans chercher des simplifications qui ne pourraient être apportées qu'au détriment de leur exactitude.

Dans tous les cas, il convient de se rendre compte, au préalable, du degré de précision que comporte chaque essai, et de ne pas tirer de conclusions de la comparaison de résultats numériques dont l'écart serait inférieur aux erreurs d'expérience compatibles avec la méthode employée, eu égard au nombre des résultats isolés dont ces chiffres sont les moyennes.

Une autre recommandation importante, commune à tous les essais, est qu'on ne doit jamais employer aucun appareil qui n'ait été soigneusement vérifié, et qui ne puisse l'être de nouveau de temps en temps, s'il est sujet à se fausser à l'usage ou à varier de quelque façon que ce soit.

Dans le même ordre d'idées, il faut qu'on puisse avoir une entière confiance dans les auxiliaires auxquels on est obligé d'avoir recours. Lorsqu'il s'agit d'employer des méthodes d'essai définies avec une rigueur absolue, comme elles doivent l'être, le rôle des manipulateurs doit se borner à appliquer d'une manière machinale et comme automatique la lettre même des prescriptions réglementaires. Mais encore est-il indispensable qu'ils ne commettent pas de fautes matérielles, telles que des erreurs de pesée ou de lecture, et, à cet égard, le directeur des essais doit user de tous les moyens de vérification dont il dispose. Souvent les lois de la nature paraîtraient moins impénétrables sans les entraves apportées par l'homme à leur libre manifestation.

Enfin, les meilleurs appareils, les opérateurs les plus sûrs et les méthodes les plus rigoureuses risqueraient de donner des renseignements trompeurs si la prise d'échantillon n'était faite avec intelligence et précaution.

Suivant les cas, on devra faire des essais distincts sur des échantillons pris en des points variés d'une fourniture, ou, au contraire, opérer sur un produit moyen obtenu par le mélange de divers échantillons. On n'oubliera pas, d'ailleurs, que les composés hydrauliques en poudre s'altèrent rapidement à l'air et doivent être conservés dans des récipients hermétiquement clos.

De même, il n'est pas indifférent d'opérer sur la matière conteuue au milieu d'un sac ou sur le pourtour.

§ 2. — Examen des principaux essais

63. Essais immédiats. — Ces essais, destinés à faire connaître ce que nous avons appelé précédemment les *propriétés immédiates* des chaux et ciments, par opposition avec ceux qui portent sur des produits réduits à l'état de pâtes ou de mortiers, peuvent fournir des données absolues ou purement conventionnelles, suivant qu'ils s'appliquent à des propriétés invariables des composés étudiés ou que les résul-

tats sont liés intimement au dispositif expérimental adopté.

Dans le premier cas, comme, par exemple, lorsqu'il s'agit de déterminer le poids spécifique ou la composition chimique élémentaire d'un produit, toute méthode, pourvu qu'elle soit juste, convient également à la recherche du but qu'on se propose ; dans le second, au contraire, le dispositif à employer doit être exactement défini.

64. Essais de finesse[1]. — Pour définir le degré de finesse d'un composé hydraulique en poudre, on détermine le poids du résidu laissé par un poids 100 de cette poudre sur un ou plusieurs tamis en toile métallique bien définis quant au nombre de leurs mailles et quant aux diamètres des fils dont ils sont formés.

Comme, en raison de la forme irrégulière des grains, tous ceux dont les dimensions diffèrent peu de celles du vide des mailles n'ont pas la même probabilité de se présenter dans une orientation convenable pour traverser la toile, le tamisage peut être prolongé très longtemps sans qu'il cesse de passer un peu de matière, et il y a incertitude sur l'instant où il convient de l'arrêter. L'opération va, d'ailleurs, plus ou moins vite, suivant qu'on secoue le tamis à la main ou au moyen d'un dispositif mécanique.

La Commission a adopté pour l'essai des ciments des tamis ayant respectivement 324, 900 et 4.900 mailles par centimètre carré avec fils de $0^{mm},20$, $0^{mm},15$ et $0^{mm},05$ de diamètre (dimensions des jours $= 0^{mm},36$, $0^{mm},18$ et $0^{mm},09$). Pour les chaux, le dernier de ces tamis a été remplacé par une toile de 2.025 mailles par centimètre carré avec fils de $0^{mm},10$ (dimensions des jours $= 0^{mm},12$) [2].

En outre, elle a recommandé d'opérer sur 100 grammes et de considérer le tamisage, fait à la main, comme terminé,

[1] Voir plus particulièrement, parmi les travaux de la Commission, les rapports de M. Durand-Claye sur les *Essais de tamisage* et *Sur le tamis le plus fin à adopter pour les chaux*, Vol. IV, pp. 5 et 301.

[2] Ces quatre tamis correspondent à peu près aux toiles métalliques portant, dans le commerce, les n[os] 50, 80-85, 180-200 et 110-120. Le troisième a été souvent appelé tamis de 5.000 mailles.

lorsqu'il passe moins de $0^{gr},1$ de matière sous l'action de 25 tours de bras.

On ne peut guère fabriquer avec une régularité assurée de toile plus fine que celle de 4.900 mailles, et déjà celle-ci laisse souvent à désirer.

Un procédé qui permet de pousser la séparation beaucoup plus loin, et auquel nous faisions allusion dès 1889[1], consiste à opérer par lévigation en faisant barboter le ciment dans un courant liquide ascendant, dont la vitesse peut être réglée à volonté et qui entraîne les particules les plus fines. Les grains non entraînés à une vitesse déterminée sont recueillis, séchés et pesés. Après les divers perfectionnements que nous avons été amené à lui faire subir, l'appareil (*fig.* 63) s'est trouvé être finalement presque identique à celui que Schœne emploie pour les essais d'argile[2].

Fig. 63. — *Légende :* A : Prise d'eau. — B : Niveau constant. — C : Robinet de réglage. — D : Robinet d'arrêt. — E : Tube à lévigation.

Mais, pour la même raison que dans les essais par tamisage, une convention est encore nécessaire sur l'instant où l'on doit arrêter l'opération.

Il n'en serait pas de même si la grosseur limite correspondant à une toile ou à une vitesse de courant déterminée ne dépendait plus de la forme de chaque grain, et si, par exemple, on trouvait le moyen de classer les grains rigoureusement d'après leurs poids ou leurs volumes.

On a vu (art. 36) qu'une certaine incertitude régnait encore

[1] *Annales des Ponts et Chaussées*, 1890, I, p. 353.

[2] On trouvera notamment, dans la *Chimie* de Post, une description détaillée de l'appareil de Schœne.

sur l'opportunité d'une mouture plus ou moins fine. Il n'en est pas moins utile dans bien des cas de connaître la finesse des produits que l'on emploie, soit comme un des caractères permettant d'en établir le signalement, soit pour contrôler la régularité de la fabrication, soit enfin en vue de l'enseignement qu'on pourra tirer plus tard des effets observés dans la pratique.

Nous avons donné à la fin de l'article qui vient d'être cité un résumé des principales conditions de finesse qui ont été imposées aux portlands. Il est à noter que le cahier des charges de Boulogne n'en a fixé aucune. Les colonnes 11 à 13 du tableau I (p. 580) donnent les résultats trouvés soit par tamisage, soit par lévigation, pour un certain nombre de produits hydrauliques.

65. Détermination du poids spécifique. — Le poids spécifique est une qualité bien définie, dont les procédés de mesure sont décrits dans tous les cours de physique ; il est donc inutile de s'attarder à les détailler. La principale difficulté, dans le cas des produits hydrauliques, réside dans leur état pulvérulent qui exige certaines précautions pour l'élimination des bulles d'air interposées. En vue de faciliter ces essais, on a proposé divers appareils, dont nous ne donnerons pas la description[1]. Comme ces produits sont attaqués par l'eau, on opère dans des liquides, tels que la benzine ou l'essence de térébenthine, de densité connue et n'exerçant sur eux aucune action.

Ainsi qu'on l'a vu à l'article 37, le poids spécifique suffit rarement à caractériser un produit. Il peut néanmoins donner parfois des renseignements utiles, notamment comme moyen d'identification et dans la recherche des falsifications, à condition qu'on opère sur des produits n'ayant encore absorbé que des proportions insignifiantes d'eau et d'acide carbonique.

[1] Voir le rapport de M. Candlot à la Commission des Méthodes d'Essai, Vol. IV, p. 15, et l'ouvrage de M. C. Schoch, déjà cité.

66. Essais gravimétriques. — Pour déterminer dans des conditions toujours comparables la densité apparente d'un composé hydraulique en poudre, la première condition est que le degré de tassement soit toujours le même.

A cet effet, on a recours à divers dispositifs pour remplir la mesure, soit qu'on fasse glisser le ciment le long d'un plan incliné de pente et de dimensions déterminées (cahier des charges de Boulogne) ou qu'on lui fasse traverser un entonnoir bien défini muni ou non de tamis (règle allemande, Commission des Méthodes d'Essai, etc.). Le plus souvent, la mesure dans laquelle on recueille la poudre est placée sur un support inébranlable et ne doit subir aucune trépidation pendant la durée du remplissage (tassement minimum). Dans d'autres cas, on cherche à donner à la matière le maximum de serrage qu'elle peut subir, en imprimant à la mesure des chocs à al main ou à la machine jusqu'à ce qu'on ne constate plus aucun tassement.

Cet essai fournit donc une donnée purement conventionnelle et doit par suite être défini rigoureusement[1].

Appliqué aux produits tels qu'on les trouve dans le commerce, il donne des chiffres qui dépendent beaucoup plus du degré de finesse des poudres que de leurs autres propriétés, de sorte qu'il fait double emploi avec l'essai de finesse sans avoir la même précision que ce dernier.

Aussi beaucoup de règlements spécifient-ils que le poids du litre sera déterminé pour la poussière ayant traversé le tamis de 4.900 mailles, de manière à rendre plus comparables les finesses des diverses poudres. Mais, dans ce cas encore, diverses influences peuvent fausser l'essai, qui donne rarement, ainsi que nous l'avons montré plus haut (art. 38), des renseignements absolument surs.

Il importe d'ailleurs de n'attacher aucune valeur intrinsèque au poids mesuré pour une poudre isolée, mais de le comparer à celui d'une poudre obtenue de la même manière avec un échantillon type. Ainsi, le cahier des charges de

[1] Voir le rapport spécial de M. Alexandre sur la *Détermination de la densité apparente*, Vol. IV, p. 21.

Boulogne prescrit de comparer le poids du litre non tassé de fine poussière de l'échantillon soumis aux épreuves de réception à celui d'un ciment obtenu par mouture à la finesse ordinaire, puis tamisage à la toile de 4.900 mailles, d'un lot de roches pures parfaitement cuites prises dans la même usine.

Dans ces conditions et si l'on a soin d'opérer sur les ciments avant qu'ils aient absorbé aucune trace d'acide carbonique et de vapeur d'eau, une densité apparente trop faible (le cahier des charges accorde une tolérance de 100 grammes au-dessous du poids type obtenu avec le ciment de roches pures) peut dénoter une cuisson insuffisante et surtout une addition exagérée de poussières ou une falsification par des matières étrangères.

67. Analyse chimique. — Les nombreuses méthodes qui permettent de déterminer la composition chimique élémentaire d'un produit doivent toutes, si elles sont convenablement appliquées, conduire aux mêmes résultats, et il n'y a pas lieu d'en indiquer une comme devant être considérée comme normale. MM. Durand-Claye et Derôme ont décrit, dans la première partie de ce volume, celles qu'on emploie le plus couramment.

On ne devra d'ailleurs pas oublier que, si l'on sait reconnaître et doser exactement les éléments simples contenus dans un composé, on n'a au contraire aucune notion précise sur leurs combinaisons réciproques. Aussi la Commission a-t-elle recommandé d'indiquer au procès-verbal d'essais les éléments trouvés, sans essayer de les grouper.

Cette incertitude ôte à l'analyse chimique une grande partie de l'utilité qu'elle pourrait avoir, puisque actuellement cet essai ne permet pas à lui seul de distinguer des produits de même composition élémentaire présentant des qualités absolument différentes, tels que ceux qu'on obtiendrait, par exemple, en cuisant plus ou moins une même matière initiale ou en composant de toutes pièces des mélanges contenant les mêmes proportions des mêmes éléments simples.

L'analyse chimique présente néanmoins une certaine utilité comme moyen d'identification ou de signalement. En outre, il peut être nécessaire, dans divers cas particuliers, de doser certains éléments capables de jouer un rôle spécial, tels que la magnésie, l'acide sulfurique, l'eau, l'acide carbonique, etc.

Il convient de distinguer des analyses chimiques proprement dites certains essais, d'un caractère plus ou moins conventionnel, destinés à renseigner, suivant les idées courantes, sur les propriétés probables des produits à l'emploi. De pareils essais exigent des méthodes uniformes exactement définies ; ils ne doivent être adoptés qu'à défaut de moyens d'investigation plus rigoureux et ne donnent que des indications n'ayant rien de positif.

Telles sont, en particulier, la plupart des méthodes prescrites officiellement dans divers États pour l'essai chimique des terres, des engrais et des matières alimentaires. Lorsque, par exemple, on cherche à doser l'acide phosphorique *assimilable* d'un engrais, on adopte pour l'analyse un dispositif empirique, rigoureusement défini, que l'on suppose donner les indications correspondant le mieux aux phénomènes qui se produisent lorsque l'engrais en question se trouve au contact de la terre humide et des racines.

En ce qui concerne les produits hydrauliques, la valeur qu'on attache parfois à la connaissance de l'*indice d'hydraulicité* (art. 10) est basée sur une convention analogue, même en supposant qu'on ne fasse intervenir dans le calcul que les éléments réellement combinés. A ce point de vue, cet indice donne plutôt une mesure de l'hydraulicité potentielle d'un calcaire que de l'hydraulicité réelle d'un produit cuit.

De même, le dosage de la *chaux libre* n'a pu encore être effectué d'une manière certaine (art. 41), malgré tout l'intérêt qu'il y aurait à pouvoir déterminer la proportion de cet élément.

Enfin, on indique souvent, dans les comptes rendus d'analyses de chaux ou ciments, une certaine teneur en *sable siliceux*, séparé par lévigation du reste de la silice. Il

suffit de faire remarquer que la proportion trouvée dépend des conditions dans lesquelles la lévigation est exécutée, pour faire ressortir le caractère conventionnel de ce dosage. Il est probable qu'en réalité une partie de l'élément qui a été dosé comme silice n'est autre que du sable siliceux plus fin que les grains séparés sous ce nom.

Comme les ciments, des pouzzolanes de même composition peuvent avoir des propriétés très différentes. On a souvent considéré comme un critérium de l'énergie d'une pouzzolane sa teneur en silice amorphe ou soluble ; encore faut-il fixer quelles sont les conditions de cette solubilité, et le dosage correspondant ne peut être actuellement basé que sur l'empirisme.

On peut rapprocher de ces méthodes d'essai approximative les procédés que l'on emploie dans l'industrie et les laboratoires de contrôle pour vérifier rapidement la composition des matières crues servant à la fabrication des chaux hydrauliques et des ciments. Parfois on se contente de mesurer au moyen d'un appareil spécial le volume d'acide carbonique chassé par l'acide chlorhydrique d'un poids connu de calcaire ; le plus souvent, on procède par pesée : le calcaire, séché à une température telle que toute l'eau soit chassée sans dégagement d'acide carbonique, est attaqué par une quantité connue d'acide chlorhydrique ; quand l'attaque est terminée, on étend d'eau, on ajoute quelques gouttes de tournesol et on précipite, dans le mélange même de matières solides et liquides, l'alumine et l'oxyde de fer par de l'ammoniaque ajoutée goutte à goutte jusqu'à neutralisation. La matière insoluble est filtrée, lavée, calcinée et pesée : elle constitue ce qu'on appelle l'argile et comprend à la fois la silice, l'alumine, le fer et une très petite quantité de chaux entraînée.

Nous avons joint à cet essai chimique un essai mécanique de finesse des pâtes, que l'on exécute en desséchant celles-ci à 110°, pesant un poids connu de matière sèche non pulvérisée, délayant dans un excès d'eau et soumettant le lait obtenu à un essai de lévigation dans l'appareil dont il a été question plus haut (*fig.* 63) avec un courant d'eau ascen-



dant de 5 millimètres par seconde. Les grains non entraînés sont recueillis, séchés et pesés.

68. Essais d'homogénéité. — Parmi les essais qui permettent de reconnaître si un produit est homogène, les principaux sont les suivants :

1° On sépare le produit par tamisage en grains de diverses grosseurs, que l'on analyse séparément. Comme, en général, les divers éléments des mélanges sont de duretés différentes, les plus tendres se rencontrent en plus grande abondance dans la fine poussière, et l'analyse révèle une différence de composition entre les poudres plus ou moins fines résultant de la séparation.

Ce procédé convient particulièrement à la recherche des additions de gypse.

2° Le produit hydraulique, débarrassé de la fine poussière passant au tamis de 4.900 mailles, est examiné soit à l'œil nu, soit à la loupe. Si l'on y aperçoit ainsi des grains d'aspects très différents, on peut avoir des doutes sur sa pureté. Toutefois, il faudrait bien se garder de conclure trop vite dans le sens d'une falsification, car les produits les plus soignés contiennent toujours des grains de diverses natures. Une grande habitude est nécessaire pour apprécier la pureté au moyen de cet essai, dont on ne doit jamais tirer de conclusions fermes sans les avoir corroborées par quelque autre observation [1]. En particulier, on peut soumettre les grains douteux à quelques essais simples de dureté ou de solubilité, ou encore, sous le microscope, à l'analyse microchimique [2].

Sauf dans ce cas tout à fait spécial, l'emploi du microscope ne doit pas être recommandé. Quant au microscope polarisant, il a fourni des indications très intéressantes dans des recherches scientifiques concernant la constitution de quelques-uns des composés qu'on rencontre dans les ciments,

[1] Voir notre rapport à la Commission des Méthodes d'Essai sur l'*Emploi de la loupe*, Vol. IV, p. 43.

[2] Pour la description de ces procédés d'analyse, voir : Michel Lévy, *les Minéraux des Roches*, chap. viii (Baudry, 1888).

mais il ne saurait être employé dans un but de contrôle ou pour des essais courants.

3° On peut encore chercher si le produit suspect n'est pas composé d'éléments de densités différentes et le séparer en ses constituants au moyen d'un liquide dont le poids spécifique soit compris entre ceux du ciment pur et des corps étrangers. M. Le Chatelier a signalé comme convenant à cet usage l'iodure de méthylène, dont on peut d'ailleurs faire varier à volonté la densité en y ajoutant plus ou moins d'iode ou de benzine. Agité dans un pareil liquide, dont la densité peut être choisie de 2,93, un ciment en poudre se sépare, après repos de quelques heures, en grains lourds de ciment qui tombent au fond et en impuretés plus légères (chaux hydrauliques, laitiers, etc.) qui flottent à la surface. On peut d'ailleurs recueillir ces impuretés et les analyser. Le seul défaut de ce procédé est d'être assez coûteux, vu le prix élevé de l'iodure de méthylène, mais on peut en réduire notablement les frais grâce à certaines précautions et à un dispositif convenable [1].

Quels qu'ils soient, les essais d'homogénéité seraient déplacés dans un cahier des charges. Préciser les méthodes à employer équivaudrait en effet, jusqu'à un certain point, à ne reconnaître comme fraudes que celles que les essais prescrits seraient capables de révéler.

69. Essais après gâchage. — Les essais exécutés sur les composés hydrauliques soumis au contact de l'eau avec ou sans addition de sable ne peuvent évidemment fournir que des résultats contingents et doivent, dès lors, être définis de la manière la plus stricte dans leurs moindres détails. L'énumération suivante résume les principales des nombreuses influences capables de modifier les conditions des essais et qui doivent être réglementées dans les devis et relatées dans les procès-verbaux :

Composition du mélange : Nature et proportion de l'eau

[1] Voir l'appareil décrit par M. Le Chatelier dans l'appendice III de son mémoire paru aux *Annales des Mines* de 1893.



employée ; abstention ou emploi de sable ; proportion, nature et grosseur du sable ; autres matières ajoutées, s'il y a lieu.

Fabrication et emploi : Température des matières et de l'air au moment du mélange ; tour de main et mode de procéder pour le malaxage ; temps écoulé entre l'addition de l'eau et l'emploi ; mode de remplissage des récipients ou des moules ; formes et dimensions de ces derniers ; mode et époque du démoulage.

Conservation : Durée et conditions de conservation depuis l'introduction de l'eau jusqu'à l'essai.

Essai : Préparation spéciale donnée, s'il y a lieu, aux échantillons en vue de l'essai ; dispositif adopté pour celui-ci ; appareils ; mode opératoire ; vitesse d'action, etc., etc.

Enfin il convient de relater les divers phénomènes qui ont pu se produire avant ou pendant l'essai et d'indiquer de quelle manière les résultats sont exprimés.

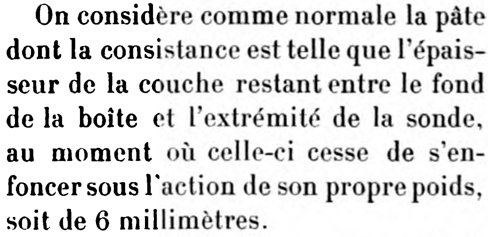
70. Essais sur pâtes pures. — Bien que, dans la pratique, on n'emploie que tout à fait exceptionnellement les produits hydrauliques sans addition de sable, certains essais sont faits sur des pâtes obtenues en gâchant simplement ces produits avec de l'eau. On donne alors à ces pâtes une consistance plastique bien définie qui en rende la manipulation facile.

La proportion d'eau à employer est réglée d'après la consistance que doit avoir la pâte après un malaxage pratiqué, pendant une durée déterminée, suivant des règles définies aussi exactement que possible ; en général, selon qu'il s'agit de produits à prise lente ou à prise rapide, on opère sur 1.000 ou sur 500 grammes de poudre et on fait durer le gâchage cinq minutes ou une minute.

La proportion d'eau normale est celle pour laquelle, après un pareil malaxage, la pâte présente la consistance normale [1].

[1] Voir le rapport de MM. Alexandre et Feret à la Commission des Méthodes d'Essai, sur la *Consistance normale des pâtes de ciment*, Vol. IV., p. 49.

Cette dernière est d'ailleurs définie soit, comme dans le cahier des charges de Boulogne, par un certain nombre de caractères, tels que le plus ou moins d'adhérence à la truelle ou à la main et la nature des déformations d'une boulette tombant d'une hauteur déterminée, soit, plus exactement, par le procédé Tetmajer, adopté par un certain nombre de règles étrangères et par la Commission française, et qui consiste à mesurer l'épaisseur de pâte non traversée par une sonde cylindrique de 10 millimètres de diamètre pesant 300 grammes (*fig.* 64), dans une rondelle de 4 centimètres d'épaisseur et de 8 à 9 centimètres de diamètre.



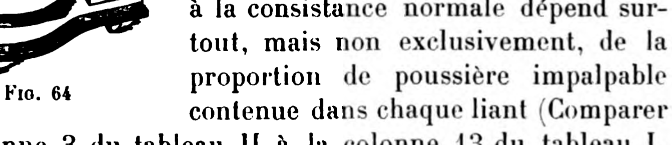


Fig. 64

On considère comme normale la pâte dont la consistance est telle que l'épaisseur de la couche restant entre le fond de la boîte et l'extrémité de la sonde, au moment où celle-ci cesse de s'enfoncer sous l'action de son propre poids, soit de 6 millimètres.

La proportion d'eau correspondant à la consistance normale dépend surtout, mais non exclusivement, de la proportion de poussière impalpable contenue dans chaque liant (Comparer la colonne 3 du tableau II à la colonne 13 du tableau I, p. 580.)

L'emploi des pâtes pures est à peu près limité aux essais de prise, de déformation et de résistance. Encore, dans ce dernier cas, a-t-on souvent contesté l'utilité des épreuves, qui sont maintenant abandonnées dans la plupart des règles étrangères.

71. Essais sur mortiers sableux [1]. — Bien qu'on n'ait pas à attendre des essais de réception, des renseignements

[1] Voir les rapports suivants à la Commission des Méthodes d'Essai :
Feret : *Sur la Composition à donner aux mortiers d'essai, etc.*, Vol. IV, p. 73. — Candlot et Feret : *Sur le Mode de fabrication actuel du sable normal.*

précis sur la manière dont les mortiers se comporteront réellement à l'emploi, il est clair que ces essais doivent inspirer d'autant plus de confiance que les mortiers étudiés se rapprochent plus de ceux des chantiers. On ne peut pourtant instituer autant d'essais distincts qu'il y a de conditions d'emploi à prévoir, et l'on doit se borner à adopter un mortier normal uniforme aussi voisin que possible de la moyenne des mortiers de la pratique.

On va voir que cette condition est loin d'être satisfaite par le type de mortier normal qui, choisi en 1878 par l'Association des fabricants allemands, est devenu dans la suite d'un usage à peu près universel.

Sable normal. — En raison de l'influence considérable de la nature et de la grosseur du sable sur les propriétés des mortiers, il importe qu'on se serve toujours, pour les essais normaux, d'un même sable, nommé dès lors sable normal, qui doit être inerte, facile à définir et livré avec garantie d'exactitude à quiconque veut s'en procurer.

En Allemagne, le sable normal est un sable siliceux pris en un point déterminé du Rhin et débarrassé de tous les grains restant sur une toile métallique de 64 mailles par centimètre carré ou passant à une toile de 144 mailles.

Le cahier des charges de Boulogne a adopté les mêmes dimensions limites et prescrit que le sable normal serait obtenu par le concassage des quartzites de la montagne du Roule à Cherbourg.

La Commission des Méthodes d'Essai a préféré à ce dernier un sable naturel à grains arrondis pris sur la plage de Leucate (Aude) et dont les dimensions limites sont définies par des tôles perforées à trous circulaires ayant respectivement 1,5 et 1 millimètre de diamètre.

Enfin, quelques règles prescrivent, au lieu d'un sable à grains uniformes comme ceux qui viennent d'être cités, un

Vol. IV, p. 63. — Durand-Claye : *Sur le Sable normal naturel*, Vol. IV, p. 67. — Feret : *Sur la Quantité d'eau à employer pour le gâchage des mortiers normaux d'essai*, Vol. IV, p. 103. — Voir aussi, pour un cas plus spécial, notre rapport sur la *Prise des mortiers sableux*, Vol. IV, p. 139.

mélange en proportions déterminées de deux ou trois sables de même nature, mais de grosseurs voisines.

Même dans ces mélanges, il y a trop peu d'écart entre les grosseurs extrêmes des grains pour qu'ils soient comparables aux sables de la nature, qui sont généralement composés de grains de toutes dimensions. *A fortiori*, les sables uniformes, qui ont le seul avantage d'être faciles à définir, diffèrent-ils complètement de ces derniers, notamment par la plus grande proportion des vides restant entre leurs grains.

Dosage. — Sur les chantiers, il est commode de mesurer le ciment au poids et le sable en volume. Pour les essais de laboratoire, un pareil mode d'opérer serait défectueux en raison de la variabilité de la quantité réelle de sable occupant un volume déterminé et de la tendance qu'on pourrait avoir à étendre aux chantiers les résultats obtenus dans les laboratoires.

La seule méthode rigoureuse est d'évaluer en poids les proportions des deux éléments.

Le dosage normal adopté presque partout est de trois parties en poids de sable pour une de ciment[1]. Il correspond assez bien aux dosages moyens de la pratique.

Il n'y a d'ailleurs aucun avantage bien marqué à instituer plusieurs mortiers normaux à divers dosages.

Eau. — Dans certains cas, notamment pour les essais de prise, la nature de l'eau de gâchage peut exercer une grande influence. La Commission a jugé qu'il convenait d'adopter, pour les essais normaux, l'usage de l'eau *potable*. Les cahiers des charges de travaux maritimes prescrivent généralement de faire les essais à l'eau de mer.

Consistance. — Contrairement aux mortiers de la pratique, qui sont gâchés avec une quantité d'eau suffisante pour présenter une consistance bien plastique, les mortiers normaux d'essai sont presque toujours mouillés avec aussi peu d'eau que possible, puis pilonnés énergiquement dans les moules.

[1] Pour les essais de chaux, on préfère souvent le dosage 1 : 5.

La proportion d'eau employée varie, suivant les échantillons et le mode de battage, entre 9 et 12 pour cent du poids du mélange sec. La matière présente alors l'apparence « de la terre humide fraîchement remuée » ; elle est presque pulvérulente et ne prend guère corps que par le damage qu'on lui fait subir.

Dès lors, les qualités du mortier obtenu dépendent surtout de son degré de serrage, et par suite du tour de main de l'opérateur, condition la plus défavorable qu'on puisse imaginer. Aussi en est-on arrivé, principalement à l'étranger, à substituer au travail manuel variable un travail mécanique constant, au moyen de divers appareils assez compliqués. On a obtenu ainsi un battage encore plus énergique, mais on a rendu l'essai de moins en moins pratique, en obligeant ceux qui veulent l'entreprendre à l'achat de machines coûteuses.

En France, le battage est effectué à la main au moyen d'une spatule d'acier d'environ 250 grammes, et prolongé jusqu'à ce que l'eau commence à ressuer hors du mortier.

Ces procédés, qui n'ont rien de rationnel, présentent surtout l'avantage commercial de conduire, dans les essais de résistance, à des chiffres élevés pouvant servir de réclame aux fabricants. Leur emploi est donc lié à une question de concurrence internationale et il serait à souhaiter qu'une entente s'établît entre les divers pays pour l'adoption d'un mortier normal plastique non damé, à sable composé de grains de grosseurs nettement variées.

72. Essais de prise. — Les essais normaux de prise ont toujours porté jusqu'à présent sur des pâtes pures [1]. La pâte, gâchée à consistance normale, est introduite dans une boîte cylindrique de 4 centimètres de profondeur et d'environ 8 centimètres de diamètre, et essayée au moyen de l'*aiguille Vicat*, cylindrique, lisse, propre, sèche, terminée par une section nette et d'équerre d'un millimètre carré (diamètre $= 1^{mm},13$) et pesant 300 grammes.

On appelle *début de prise* l'instant où l'aiguille, descendue

[1] Voir le rapport de MM. Alexandre et Feret sur la *Prise des pâtes pures*, Vol. IV, p. 111.

avec précaution et sans qu'on lui laisse acquérir de vitesse, ne peut plus pénétrer jusqu'au fond de la boîte (*fig.* 57, point A).

On appelle *fin de prise* l'instant à partir duquel la surface de la pâte peut supporter la même aiguille sans qu'elle y pénètre d'une quantité appréciable (point C).

Les durées correspondantes sont comptées à partir du moment où l'eau de gâchage a été mise au contact du ciment (point O).

La prise peut être étudiée, la pâte étant conservée à l'air ou sous l'eau ; dans les deux cas, la température ambiante doit rester aussi constante que possible pendant toute la durée de l'expérience. On en fixe généralement les limites à 15 et 18 degrés centigrades.

Enfin on peut, surtout avec les chaux qu'on soupçonne d'avoir été mal éteintes et avec les ciments rapides, suivre au thermomètre la température de la pâte pendant toute la durée de la prise, de manière à observer les dégagements de chaleur.

Une disposition commode consiste à employer le même appareil que pour l'essai de consistance normale (*fig.* 64) en remplaçant simplement la sonde par une aiguille Vicat lestée de même poids.

Si le début de prise est assez nettement défini, l'appréciation de la fin de prise est beaucoup plus délicate. La consistance adoptée correspond à peu près à celle que Vicat désignait en disant que la pâte était devenue capable de subir sans déformation apparente la pression du pouce.

Les indications fournies par les deux essais sont d'ailleurs de pure convention et dépendent du choix de l'aiguille et de la manière d'opérer.

En particulier, les durées de prise mesurées sur la pâte pure sont loin d'être proportionnelles à celles des mortiers sableux, ainsi qu'on peut en juger par la comparaison de la colonne 10 du tableau II (p. 382) avec les colonnes 6 et 7 du tableau III (p. 384).

Il serait facile d'imaginer un essai de prise normal sur mortiers sableux rigoureusement définis quant au sable, au

dosage et à la consistance. Par contre, on ne possède aucun moyen bien pratique de définir et de comparer les durées de prise de mortiers quelconques[1] : peut-être pourrait-on déterminer à des intervalles bien définis et assez rapprochés les résistances de petites masses de mortier provenant d'une même gâchée ; toutefois, ce procédé ne serait guère applicable qu'à partir du moment où le mortier aurait déjà atteint une certaine consistance.

73. Essais d'hydraulicité et d'extinction des chaux. — Les essais qu'on a le plus souvent à faire sur les chaux ont pour but de reconnaître si elles sont plus ou moins hydrauliques et si elles ne contiennent pas de grains insuffisamment éteints.

Sur le premier point, l'analyse chimique peut fournir un renseignement utile. Mais s'il est évident que, lorsque les proportions de silice et d'alumine sont faibles, une chaux ne peut durcir rapidement sous l'eau, par contre, des teneurs assez élevées en ces éléments ne correspondent pas nécessairement à une hydraulicité très développée.

On doit donc faire un essai de prise sous l'eau et juger du degré d'hydraulicité d'après le temps observé pour la fin de prise (art. 11).

Mais quand la chaux essayée contient des particules insuffisamment éteintes, leur hydratation après le gâchage produit un dégagement de chaleur qui accélère la prise et fausse l'essai. On en est averti par un gonflement plus ou moins important de la masse de pâte immergée ou même par sa désagrégation complète. Cet effet est d'ailleurs d'autant moins marqué que l'immersion a eu lieu plus longtemps après le gâchage, de sorte que la qualité d'une chaux à cet égard peut être mesurée par la durée minimum après laquelle on peut immerger les pâtes ou les mortiers sans qu'ils se désagrègent.

74. Essais de résistance. — Les essais de résistance à la rupture sont généralement ceux auxquels on a tendance

[1] Voir notre rapport sur la *Prise des mortiers sableux*, Vol. IV, p. 139.

à attacher le plus d'importance. En réalité, ils conviennent parfaitement, lorsqu'ils sont judicieusement appliqués, à donner la mesure de l'énergie d'un produit, et à ce titre ils ont une valeur indiscutable; mais on ne doit pas chercher à déduire des résistances obtenues, surtout quand il s'agit d'essais normaux, les charges qu'on pourra faire subir aux ouvrages de la pratique. Il faudrait en effet pouvoir tenir compte de la différence des conditions d'emploi et d'exposition des mortiers et savoir reconnaître exactement la nature des efforts qui interviennent, isolément ou simultanément, dans les différents cas possibles.

Du reste, sauf dans quelques cas tout à fait spéciaux, il est rare qu'une maçonnerie périsse par défaut de résistance mécanique.

On peut, dans les laboratoires, faire varier de bien des manières le mode d'application de l'effort destiné à produire la rupture; pourtant on n'emploie couramment que deux sortes d'essais, ceux par extention ou traction et ceux par compression ou écrasement.

Dans les deux cas, les conditions normales d'exécution de ces essais sont généralement les suivantes :

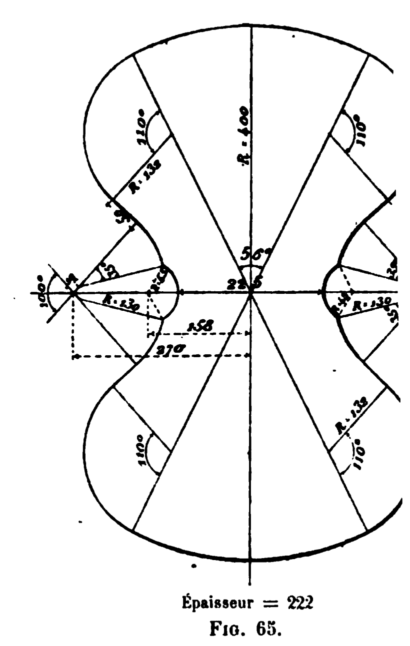
On opère sur les pâtes pures ou sur les mortiers sableux normaux composés et travaillés comme il a été dit plus haut.

Aussitôt après le moulage, les corps d'essai ou *éprouvettes* sont conservés pendant vingt-quatre heures à l'air humide (deux jours, quatre jours ou sept jours pour les chaux), puis démoulés avec précaution et immergés dans une eau qui doit rester à une température sensiblement constante (15 à 18°).

Les ruptures ont lieu après des durées fixes dont les principales, comptées à partir du gâchage, sont d'une semaine, quatre semaines et douze semaines (trois mois).

Les essais à court terme pouvant classer les produits dans un ordre tout différent de celui de leurs résistances finales, il y a intérêt à ne procéder aux ruptures que le plus tard possible; toutefois la période de trois mois est une limite extrême qu'on ne peut pas dépasser dans les épreuves de réception à cause de la gène que des essais plus prolongés

apporteraient dans le commerce et sur le



Épaisseur = 222

Fig. 65.

contente même le plus souvent des essais à

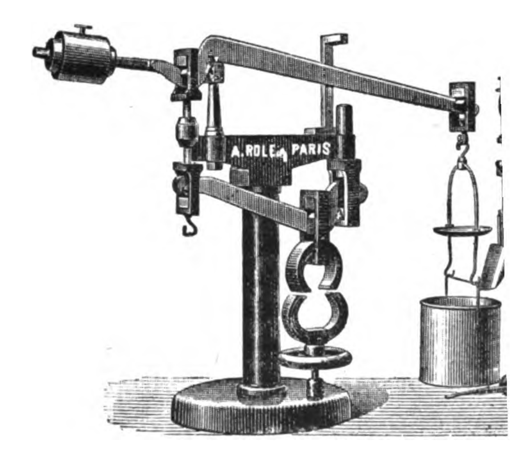


Fig. 66

Pour les essais par traction, qui sont de b

usités, on opère presque partout sur des briquettes à section étranglée de 5 centimètres carrés présentant la forme et les dimensions indiquées par la figure 65 (longueurs exprimées en dixièmes de millimètre).

La rupture doit être produite par une charge augmentant progressivement et sans à-coups.

L'appareil le plus répandu, imaginé par le D[r] Michaëlis (*fig.* 66), est formé de deux leviers combinés de telle sorte que l'effort produit au bout de l'un d'eux par de la grenaille de plomb coulant dans un seau, soit multiplié par 50 au point de suspension de la briquette. Au moment où celle-ci se brise, la chute du seau interrompt automatiquement l'écoulement du plomb. En posant le seau avec son contenu sur un peson spécial, on lit immédiatement la résistance correspondante évaluée en kilogrammes par centimètre carré de la section minimum de la briquette.

Les résistances exigées varient suivant les cahiers des charges. En moyenne, on peut compter qu'après quatre semaines d'immersion on demande aux ciments portland de supporter environ 35 kilogrammes par centimètre carré dans les essais de pâtes pures et 15 kilogrammes dans ceux de mortier sableux normal.

Les ruptures par compression n'ont lieu que sous des efforts beaucoup plus considérables et exigent des appareils plus puissants et plus coûteux. Aussi ces essais sont-ils moins en faveur que ceux de traction.

En Allemagne, on les exécute sur des cubes à faces de 50 centimètres carrés, dont l'arête mesure par conséquent un peu plus de 7 centimètres. On emploie pour la rupture un appareil à leviers combinés du même genre que l'appareil de traction du D[r] Michaëlis, mais plus puissant, ou divers types de presses hydrauliques. La résistance imposée au mortier sableux de ciment portland après 4 semaines est de 160 kilogrammes par centimètre carré.

En France, la Commission des Méthodes d'Essai a recommandé la méthode employée depuis plusieurs années au laboratoire de l'École des Ponts et Chaussées, qui consiste à écraser à plat les briquettes préalablement rom-

pues par traction et dont on a rapproché les deux moitiés[1].

Nous nous bornerons ici à ces quelques indications sommaires sur les essais *normaux* de rupture. Mais, vu l'importance qu'on attache aux résistances dans toutes les recherches relatives aux produits hydrauliques, nous consacrerons un peu plus loin un paragraphe spécial à l'étude comparée des différentes méthodes qu'on emploie pour les mesures, et nous chercherons notamment quelle est la valeur des indications qu'elles fournissent.

75. Essais d'adhérence. — Le dispositif adopté doit permettre de mesurer à la fois l'adhérence :

1° d'un même mortier sur diverses matières;

2° de divers mortiers sur un même corps d'adhérence étalon.

La plupart des méthodes proposées jusqu'ici, dont aucune n'a jamais fait l'objet de règles officielles, ont consisté à réunir des pièces de brique, de mortier, de pierre, de verre dépoli ou de toute autre matière par le mortier d'épreuve, puis, après une durée de durcissement plus ou moins longue, à provoquer le décollement en soumettant ces assemblages à un effort de traction[2].

La difficulté de ces essais réside dans l'accrochage des éprouvettes aux griffes de la machine : si l'effort n'est pas absolument normal au plan de jonction, la rupture a lieu dès que, par l'effet d'une légère flexion, le décollement commence à se produire sur l'un des bords de la surface de séparation du mortier d'essai et du corps sur lequel il est appliqué.

Dans quelques séries d'expériences faites au laboratoire de Boulogne, nous avons obvié à cet inconvénient en opérant franchement par flexion sur des prismes dont une des moitiés était constituée par le corps d'adhérence et l'autre par le mortier d'essai, moulé dans le prolongement.

Pour déterminer l'adhérence de mortiers à des barres de fer cylindriques, MM. Coignet et de Tedesco ont noyé ces

[1] Voir le rapport de M. Siméon sur les *Essais de compression et de poinçonnage*, Vol. IV, p. 187.

[2] Voir le rapport de M. Candlot sur les *Essais d'adhérenee*, Vol. IV, p. 281.

barres dans les mortiers et mesuré, après une durée de durcissement connue, l'effort de compression qu'il a fallu exercer normalement à l'un des bouts de chaque barre pour produire le décollement.

76. Essais de déformation. — Étant donné qu'un composé hydraulique de bonne qualité ne doit pas subir après durcissement de variations de volume appréciables, il faut qu'on puisse reconnaître si les échantillons essayés sont ou non dans ce cas.

L'un des essais les plus répandus consiste à étaler la pâte de ciment pur sur une plaque de verre en une galette à bords amincis d'environ 10 centimètres de diamètre et 1 à 2 centimètres d'épaisseur au centre, que l'on immerge après vingt-quatre heures. Si, après une durée plus ou moins longue, cette galette présente des veines, des fissures ou des déformations quelconques, on considère le ciment comme mauvais.

Dans les cahiers des charges relatifs à des travaux maritimes, on prescrit généralement que l'immersion ait lieu à l'eau de mer. Il importe d'ailleurs qu'auparavant la galette ne soit soumise ni à l'action directe des rayons solaires ni à celle des courants d'air. Parfois on évite ces causes perturbatrices en prescrivant une immersion immédiate, ce qui rend généralement l'essai plus sévère.

Si l'on veut mesurer exactement les déformations, on peut opérer sur de petits blocs que l'on mesure à des intervalles déterminés au moyen d'un appareil de précision, tel que celui de Bauschinger[1], ou encore, suivant la méthode de MM. Durand-Claye et Debray, sur des prismes de $0^m,80$ de longueur, enfermés dans un tube de verre, et dont l'allongement est amplifié par une aiguille formant levier et se déplaçant devant un cadran[2].

Enfin, on a songé à accélérer les déformations, tout en les rendant plus visibles, en soumettant les éprouvettes à

[1] *Mittheilungen aus dem mechanisch-technischen Laboratorium der technischen Hochschule in München*, Heft VIII, p. 13, 1879.

[2] *Annales des Ponts et Chaussées*, 1888, I, p. 810, et rapport de M. Debray à la Commission. Vol. IV, p. 221.

l'action de la chaleur. De là une foule d'essais sur boulettes ou galettes chauffées dans une flamme, dans de la vapeur d'eau, comprimée ou non, ou dans de l'eau plus ou moins chaude[1]. En particulier, la Commission des Méthodes d'Essai a adopté en principe un dispositif proposé par M. Le Chatelier pour mesurer le gonflement de petits cylindres en pâte pure maintenus pendant quelques heures dans de l'eau échauffée à une température déterminée[2]. Dans le même ordre d'idées, on a parfois préconisé d'immerger à l'eau chaude des briquettes pour essais de résistance, en vue d'accélérer le durcissement et de déceler par des chutes de résistance des désagrégations moléculaires échappant à l'observation directe.

Si l'on peut affirmer qu'un produit qui, dans l'essai à froid, donne lieu à des déformations nettement accentuées, est certainement dangereux pour un emploi dans des conditions analogues et doit être considéré comme suspect dans la plupart de ses applications, rien ne prouve qu'inversement la bonne tenue des galettes soit une garantie suffisante.

A fortiori peut-on douter que les résultats des essais à chaud correspondent exactement aux qualités réelles des matériaux à l'emploi : s'il paraît à peu près unanimement reconnu qu'un mauvais ciment devra toujours gonfler dans l'eau chaude, certains fabricants contestent qu'un produit qui supporte mal cet essai doive être nécessairement considéré comme mauvais.

77. Détermination du rendement et de la composition volumétrique élémentaire[3]. — On appelle *rendement* d'une chaux ou d'un ciment employé pur le volume de pâte fourni par l'unité de poids de poudre.

[1] Voir nos *Extraits de divers documents relatifs aux essais d'invariabilité de volume et aux essais à chaud en général*. Commission des Méthodes d'Essai, 2e session.

[2] Voir divers rapports de M. Le Chatelier à la Commission. L'appareil se compose d'un moule cylindrique en cuivre mince, fendu suivant une génératrice et portant, soudées de chaque côté de la fente, deux longues aiguilles dont les extrémités s'écartent en raison du gonflement du ciment contenu.

[3] Voir notre note à la Commission des Méthodes d'Essai relativement à ces essais (Vol. IV, p. 243). Il conviendra seulement d'y substituer la formule *Composition volumétrique élémentaire* au mot *Compacité*.

Dans le cas des mortiers sableux, le même mot représente souvent le volume de mortier correspondant à 1 mètre cube de sable. Outre que cette définition n'a rien de rigoureux à cause du tassement variable que peut éprouver le sable suivant la manière dont on le mesure, elle diffère de la première. Aussi conviendrait-il d'appeler rendement d'un mélange de sable et de ciment le volume de mortier fourni par l'unité de poids du mélange sec, ainsi d'ailleurs que la Commission des Méthodes d'Essai l'a proposé.

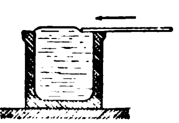
La détermination du rendement est simple et peut être faite, par exemple, en mesurant dans une éprouvette graduée la pâte ou le mortier fournis par 1 kilogramme de poudre ou de mélange.

Loin de renseigner sur la qualité des produits, le rendement ne sert guère ordinairement qu'à calculer le poids de ciment ou de chaux qui doit être incorporé à 1 mètre cube d'un sable donné, dont on connaît le volume des vides, pour que le mortier soit compact, ce que l'on fait en choisissant ce poids de manière que le volume de pâte correspondant soit précisément égal à celui des vides du sable. Cette opération repose sur un raisonnement faux, car l'écartement des grains peut être tout à fait différent dans le sable pur et dans le mortier en œuvre, et d'ailleurs l'expérience montre que l'on n'a jamais de mortiers sans vides.

Il est préférable de déterminer *a posteriori* la *composition volumétrique élémentaire* d'une série de mortiers à divers dosages et de voir lequel est le plus compact.

Si C, S et E sont les poids de ciment, de sable et d'eau employés pour une gâchée, et si P est le poids de mortier qui remplit une mesure de capacité connue V[1], les poids des

[1] Il faut se méfier des mesures du commerce, qui, même poinçonnées, sont rarement bien justes. Il vaut mieux employer un pot cylindrique, à parois épaisses et à bord supérieur parfaitement plan; autant que possible, la hauteur doit être sensiblement égale au diamètre et le fond doit se raccorder doucement avec la paroi verticale.


Fig. 66 *bis*.

Pour mesurer exactement la capacité de ce vase, on le pèse vide en même temps qu'une plaque de verre, on l'emplit d'eau jusqu'à déborder, on ferme avec la plaque de verre en la glissant horizontalement contre le bord (*fig.* 66 *bis*), on essuie sans laisser rentrer d air et on pèse de nouveau.

trois éléments entrant dans l'unité de volume de mortier sont $\frac{P}{V}\frac{C}{C+S+E}$, $\frac{P}{V}\frac{S}{C+S+E}$ et $\frac{P}{V}\frac{E}{C+S+E}$ et leurs volumes absolus *c*, *s*, *e* sont les quotients de ces poids par les poids spécifiques correspondants. Quant au volume des vides *v*, on le calcule par différence.

78. Essais de porosité et de perméabilité. — Comme ceux de rendement, ces essais n'ont été exécutés jusqu'à présent qu'à titre de recherches et n'ont jamais, à notre connaissance, été prévus dans aucun cahier de charges. Les chiffres qu'ils fournissent dépendent, en effet, beaucoup moins de la nature des liants hydrauliques employés que de la composition des mortiers, et les variations de porosité et de perméabilité provenant pour un mortier du choix de tel ou tel liant, sont négligeables en comparaison de celles que peuvent entraîner d'assez faibles changements dans la composition des fournitures de sable ou dans la manipulation du mortier.

Aussi les essais en question, propres à la comparaison de mortiers de compositions variées, ne présentent-ils aucun intérêt si l'on veut les appliquer à des mortiers normaux faits dans des conditions toujours identiques, en vue de différencier divers liants hydrauliques.

Les méthodes à employer pour mesurer la porosité et la perméabilité d'un mortier résultent d'ailleurs des définitions mêmes que nous avons données de ces qualités à l'article 51.

79. Essais de décomposition par l'eau de mer. — Les mortiers qui se conservent le mieux dans l'eau de mer n'étant pas nécessairement ceux qui ont les plus fortes résistances, il est d'un intérêt capital pour la sécurité des travaux maritimes qu'on puisse reconnaître rapidement si un produit est plus ou moins réfractaire à l'action décomposante de cette eau. Malheureusement, on ne possède encore aucune méthode à la fois sûre et expéditive.

Dans les cahiers de charges pour les ouvrages des ports, on se contente généralement de stipuler que les éprouvettes

destinées aux essais de rupture, de même que les galettes pour essais de déformation, seront conservées dans de l'eau de mer. Comme les éprouvettes de ciment pur et de mortier normal dont on se sert sont à la fois peu poreuses et peu perméables, l'action saline se limite à leur surface et il ne se produit de désagrégations un peu rapides que dans quelques cas exceptionnels.

Des mortiers maigres conviendraient bien mieux à l'observation des décompositions, mais exigeraient, pour permettre de comparer sûrement divers liants hydrauliques, un tassement rigoureusement identique, difficile à réaliser, qui leur assurât à tous, pour une même composition pondérale, un même agencement des grains solides. Il serait d'ailleurs nécessaire d'opérer concurremment sur des blocs simplement immergés et sur d'autres blocs soumis à une filtration continue, de manière à faire intervenir surtout soit la porosité soit la perméabilité des mortiers.

La plupart des auteurs qui se sont occupés d'expériences de cette nature ont constaté que l'action de l'eau de mer dans les laboratoires, alors même qu'on renouvelle cette eau fréquemment, diffère de celle de la mer libre. En général, elle est plus marquée, ce que l'on explique par l'absence de dépôts préservateurs et par une moindre carbonatation. Pour s'affranchir de l'influence protectrice de l'acide carbonique, qui vient fausser les essais, il importe d'opérer, comme faisait Vicat, en faisant durcir les mortiers à l'abri de ce gaz, par exemple dans des flacons hermétiquement clos, puis en les immergeant dans l'eau de mer ou dans un liquide analogue, après avoir mis leur surface à vif et dressé nettement leurs faces et leurs arêtes. L'eau doit être changée très souvent, surtout dans les premiers temps, car au contact du mortier elle s'appauvrit en magnésie et s'enrichit en chaux. Vicat la renouvelait dès qu'elle précipitait par l'oxalate d'ammoniaque.

Pour que les essais à l'eau de mer pussent être exécutés même loin des côtes, la Commission des Méthodes d'Essai a fixé la composition d'une eau de mer artificielle dont elle recommande l'emploi toutes les fois qu'on ne peut se procurer



aisément l'eau de mer naturelle. Cette composition, qui correspond à peu près à celle de la Méditerranée, est la suivante :

Chlorure de sodium	NaCl.........	30gr
Sulfate de magnésie cristallisé......	$MgOSO^3,7HO$.	5
Chlorure de magnésium cristallisé..	MgCl,6HO....	6
Sulfate de chaux hydraté..........	$CaOSO^3,2HO$..	1,5
Bicarbonate de potasse	$KOHO,2CO^2$...	0,2
Eau distillée, de pluie ou de rivière bouillie.........		1.000

§ 3. — Retour sur les essais de résistance a la rupture

80. Contingence des essais de résistance. — Quelle que soit la nature de l'effort qu'on fait subir aux éprouvettes, flexion, traction, compression, cisaillement, poinçonnage, etc., un même mortier peut se rompre sous des charges très différentes, suivant la manière dont l'essai est dirigé. Par exemple, il est évident que le résultat doit varier suivant qu'on opère par chocs successifs, égaux ou croissants, entre lesquels l'effort revient à zéro (coups de mouton), par addition à intervalles fixes, avec ou sans choc, de poids finis à la charge déjà agissante, par accroissement continu plus ou moins rapide de la charge (écoulement de grenaille ou de liquide), enfin, par une charge statique constante indéfiniment prolongée. C'est ainsi que Vicat distinguait les *forces instantanées*, nécessaires pour rompre l'éprouvette en quelques minutes ou même quelques heures et conséquemment relatives, des *forces permanentes*, correspondant à l'effort maximum que le corps peut supporter indéfiniment sans se rompre, plus faibles que les premières et plus difficiles à mesurer, mais qui donneraient la véritable mesure de la résistance des corps. D'une manière générale, on constate que la durée d'action de la force en augmente les effets, de sorte que l'effort nécessaire pour produire la rupture est d'autant plus faible qu'on fait durer plus longtemps la période de chargement.

Une autre cause de contingence des résistances obtenues dans les essais est la difficulté d'exercer l'effort uniformément sur toute la section des éprouvettes. Suivant les formes de celles-ci et des organes par lesquels l'effort leur est transmis, la répartition des tensions ou pressions intérieures varie, et les résultats cessent d'être comparables.

On se contente d'ailleurs, sauf dans quelques recherches tout à fait spéciales, de mesurer la charge de rupture, indication certainement intéressante, mais qui ne renseigne que fort incomplètement sur la valeur pratique des matériaux, et qui demanderait à être complétée par la connaissance du coefficient et de la limite d'élasticité, si la mesure de ces nombres n'était pas particulièrement délicate avec les matières qui nous occupent.

Enfin, les résultats des essais mécaniques sont encore faussés par le manque d'homogénéité des éprouvettes, provenant, alors même que le mortier aurait été parfaitement mélangé lors du moulage, du durcissement inégal du pourtour et du centre de chaque bloc.

En somme, les résistances à la rupture dépendent en partie des conventions d'après lesquelles les essais ont été réglés, et ne permettent de comparer plusieurs produits ou mortiers que si elles ont été mesurées dans des conditions en tous points identiques.

Un examen des principaux genres d'essais va nous éclairer sur le degré de confiance qu'on peut avoir en chacun d'eux.

81. Traction. — Dans une savante étude à laquelle le lecteur devra se reporter à propos de la plupart des questions traitées dans ce paragraphe[1], M. L. Durand-Claye a montré par la théorie et par l'expérience que, par suite du mode de suspension des éprouvettes dans les griffes des appareils d'essai, l'effort produit, loin d'être uniformément réparti dans la section de rupture, était plus fort sur les rives que

[1] *Mémoire sur les procédés d'essai de la résistance des pierres, ciments et autres matériaux de construction.* — *Annales des Ponts et Chaussées*, 1888, II, pp. 173 à 211. Une suite a été donnée à cette étude dans la même publication : 1895, I, pp. 604 à 612.

vers le centre. Il résulte de là que la rupture se produit dès que la tension marginale atteint une certaine limite, de sorte que la tension moyenne obtenue en divisant l'effort total par la section est plus faible que la résistance réelle. Comme seconde conséquence, la résistance ainsi réduite à l'unité de surface doit diminuer à mesure qu'on opère sur de plus grosses briquettes, observation que l'expérience a confirmée depuis longtemps. La question se complique d'ailleurs de ce que la rupture se produit assez souvent en dehors de la section minimum, ainsi que du manque d'homogénéité déjà signalé.

Pour évaluer cette dernière influence, nous avons comparé les résistances de briquettes homogènes en mortier (prismes de 4 centimètres de côté terminés par des épaulements pour l'application des griffes de suspension) à celles de briquettes pareilles sur les faces desquelles une couche plus ou moins épaisse de mortier avait été remplacée par du ciment pur, de telle sorte que la coupe de la partie prismatique de ces briquettes présentait la disposition indiquée sur la figure 67, p. 420.

Le tableau ci-dessous, qui relate les résultats de cette expérience, montre que l'augmentation de résistance provenant d'épaisseurs de ciment pur inférieures à 1 centimètre a été un peu plus rapide que si elle était restée proportionnelle à la fraction de section occupée par le ciment pur.

Côté du prisme intérieur en mortier sableux (en centimètres). $a =$	4	3,8	3,5	3,3	3,1	2,8	2,55	2,0	0
Épaisseur de ciment pur sur chaque face du prisme intérieur. $\frac{4-a}{2} =$	0	0,1	0,25	0,35	0,45	0,6	0,725	1,0	cim. pur
Effort total trouvé nécessaire pour rompre la briquette (en kilogrammes.) .... T =	96	121	152	174	192	220	236	255	309
Effort qui correspondrait à une augmentation uniforme : $T' = \frac{96}{16} a^2 + \frac{309}{16} (16 - a^2)$. T' =	96	117	146	164	181	205	222	256	309

Des expériences répétées sur des mortiers d'âges et de

compositions variés nous ont montré que les résistances obtenues avec des briquettes de différentes dimensions sont sensiblement proportionnelles entre elles, et que notamment, quand on compare les anciennes briquettes de 16 centimètres carrés de section minimum aux briquettes actuelles dont la section étranglée ne mesure que 5 centimètres carrés, les résistances par centimètre carré des premières sont égales aux deux tiers de celles des secondes[1].

Nous avons de même constaté que, quand on essaie à la traction, en les saisissant dans des mâchoires spéciales, des moitiés de prismes de $0^m,04 \times 0^m,04$ préalablement rompus par flexion, les résistances obtenues sont, aux erreurs d'expérience près, égales à celles des briquettes de 16 centimètres carrés dont on se servait autrefois.

82. Flexion. — La *Résistance des Matériaux* enseigne que, si l'on charge en son milieu un prisme de largeur b et d'épaisseur h posé sur deux appuis distants de l, la charge P qui, à un instant quelconque de la période élastique, correspond à un effort maximum R de traction et de compression dans les régions les plus fatiguées, est donnée par la formule :

$$P = \frac{2}{3} \frac{bh^2}{l} R.$$

En étendant cette loi jusqu'à la rupture, on calcule que, pour une matière donnée, le poids qu'il faut appliquer au milieu du prisme pour le rompre est proportionnel au quotient $\frac{bh^2}{l}$.

Dans le cas des mortiers, l'expérience nous a montré que le coefficient de proportionnalité était à peu de chose près

[1] Le meilleur moyen de reconnaître si deux modes d'essai donnent avec tous les mortiers possibles des résistances proportionnelles consiste à représenter chaque mortier par un point ayant pour coordonnées les deux résistances que l'on compare. S'il y a proportionnalité, tous les points se groupent autour d'une droite issue de l'origine et dont le coefficient angulaire donne la valeur probable du rapport des deux résistances.

$\frac{bh^n}{l}$, n étant un exposant un peu inférieur à 2, surtout quand on opérait sur des prismes de petites dimensions.

Cette discordance avec la formule théorique tient en partie à ce que celle-ci cesse d'être applicable dès qu'on dépasse la limite d'élasticité et aussi à l'influence prédominante de la composition du mortier au voisinage des faces du prisme.

M. Durand-Claye a d'ailleurs établi que la formule $R = \frac{3}{2} P \frac{l}{bh^2}$, qui devrait donner la résistance à la traction par unité de surface en fonction de la charge de rupture par flexion, était fausse par suite de la non-proportionnalité des allongements aux tensions aux approches de la rupture, et donnait pour R des valeurs trop fortes, variables d'ailleurs suivant les dimensions du prisme.

En tous cas, nous avons vérifié sur de très nombreux mortiers qu'il y avait proportionnalité entre les résistances à la traction et celles à la flexion [1]. En particulier, les résistances à la traction par centimètre carré, telles qu'on les déduit des essais sur les briquettes normales actuelles de 5 centimètres carrés, peuvent être déduites des charges centrales de rupture des prismes carrés de 4 centimètres de côté posés sur deux appuis distants de 10 centimètres, qui nous servent maintenant pour la plupart de nos expériences sur les mortiers, en multipliant ces dernières par le coefficient empirique $\frac{3}{26}$, soit, en fraction décimale, 0,1154.

L'essai de flexion fait donc double emploi avec celui de traction. Il lui est d'ailleurs préférable à cause de la forme simple des éprouvettes (facilité de définition et de fabrication), de la commodité d'exercer exactement l'effort avec un poids relativement minime et de sa plus grande précision, qui se traduit par de moindres écarts entre les résistances d'éprouvettes faites avec un même mortier et conservées dans des conditions identiques.

[1] M. Durand-Claye avait déjà constaté cette proportionnalité pour le cas particulier d'éprouvettes de ciment pur. On peut de même la vérifier graphiquement en partant des tableaux de résistances publiés par Bauschinger dans les fascicules VII et VIII de ses *Mittheilungen*.



Toutefois, cet essai a le grave inconvénient, auquel nous avons déjà fait allusion, d'être fortement influencé par l'état particulier des régions immédiatement voisines de la surface libre des prismes, et par suite faussé par les modifications qu'éprouve le mortier dans ces régions au contact des agents extérieurs [1].

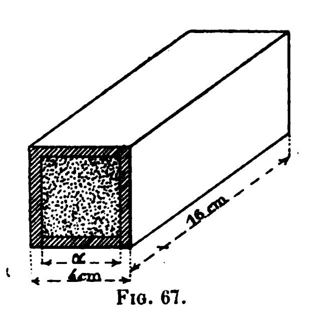


Fig. 67.

Nous l'avons vérifié d'une manière particulièrement frappante par des essais de flexion faits, dans des conditions analogues aux essais de traction signalés à l'article précédent, sur des prismes dont la section présentait la disposition indiquée par la figure 67. La première partie du tableau ci-dessous montre qu'il a suffi d'une couche extrêmement mince de ciment pur pour augmenter considérablement la résistance du prisme.

Côté du prisme intérieur en mortier sableux (en centimètres) $a =$	4	3,75	3,5	3,25	3	2,75	2,5	2	0
Épaisseur de ciment pur sur chaque face du prisme intérieur (en centimètres) $\frac{4-a}{2} =$	0	0,125	0,25	0,375	0,5	0,625	0,75	1	cim. pur
Charge centrale trouvée nécessaire pour rompre par flexion le prisme posé sur deux appuis distants de 10 cm. (en kg.). $F =$	51	110	188	219	255	280	308	311	325
Charge qui correspondrait à la formule empirique : $F' = 323 - 0{,}27a^5$. $F' =$	47	123	181	225	257	280	297	314	323
Charge trouvée nécessaire pour rompre par compression les demi-prismes posés en croix entre deux plaques d'acier de 4 cm de largeur (en kg. par cm²). $P =$	30	44	66	82	109	(103)	142	183	330
Charge qui correspondrait à une augmentation uniforme : $P' = \frac{27}{4} a + \frac{330}{4} (4 - a)$. $P' =$	27	46	65	84	103	122	141	179	330

[1] Cette hétérogénéité des éprouvettes a déjà été mise en évidence, pour un cas particulier, dans le renvoi de la page 315.

83. Compression. — Dans les essais par compression, où l'effort est exercé uniformément sur tous les points de la surface pressée, il ne semble pas *a priori* que telle ou telle région du bloc doive avoir une influence prépondérante.

Cette conclusion ressort bien nettement des deux dernières lignes du tableau précédent, ainsi que d'autres expériences analogues. On constate toujours que l'augmentation de résistance résultant de la substitution de ciment pur à des zones de mortier symétriques par rapport à l'axe de la compression est proportionnelle à la section de ces zones, qu'elles soient au centre du bloc ou le long de ses parois.

D'autre part, l'influence de la forme et des dimensions de l'éprouvette sur la résistance obtenue est bien moindre que dans les essais de traction, au moins tant qu'on n'opère pas sur des solides de forme trop aplatie. Cette influence à été particulièrement étudiée par Vicat [1], puis par Bauschinger [2], qui a cru pouvoir représenter la résistance par centimètre carré P d'une pièce prismatique ou cylindrique de hauteur h, et dont la base a pour périmètre p et pour section s, par la formule :

$$P = \sqrt{\frac{\sqrt{s}}{\left(\frac{p}{4}\right)}}\left(\lambda + \nu\frac{\sqrt{s}}{h}\right),$$

dans laquelle λ et ν sont deux constantes dépendant de la nature de la matière. Cette formule indique notamment que la résistante ramenée au centimètre carré est la même pour des prismes semblables, quel que soit le rapport de leurs dimensions homologues.

Dans la rupture par compression des matériaux grenus tels que les pierres et les mortiers, il n'y a pas désagrégation de toute la masse de la matière, et le bloc se sépare en fragments dont chacun conserve à peu près sa cohésion.

Quand la hauteur dépasse notablement les dimensions

[1] *Annales des Ponts et Chaussées*, 1833, II, p. 201.
[2] *Mittheilungen*, 6e fascicule, 1876.

linéaires de la base, les fragments glissent les uns sur les autres suivent les plans de rupture, et le bloc s'effondre brusquement. Il reste alors, en général, une sorte de cône plus ou moins allongé ayant pour base l'une des faces pressées.

Pour une hauteur moindre, il se détache des solides limités par le contour latéral de la pièce d'essai, et il reste deux troncs de pyramide ou de cône ayant pour grandes bases les faces pressées et s'appuyant l'un sur l'autre par leurs petites bases ; un effort supplémentaire est nécessaire pour achever la rupture, de sorte que la résistance ramenée à l'unité de surface pressée est plus grande que dans le cas précédent.

En particulier, quand on écrase à plat des demi-briquettes normales provenant d'essais de traction, ou des rondelles cylindriques de dimensions analogues, les résistances dépassent celles de pièces cubiques ; toutefois elles leur restent proportionnelles[1].

Enfin, à mesure qu'on emploie des éprouvettes de plus

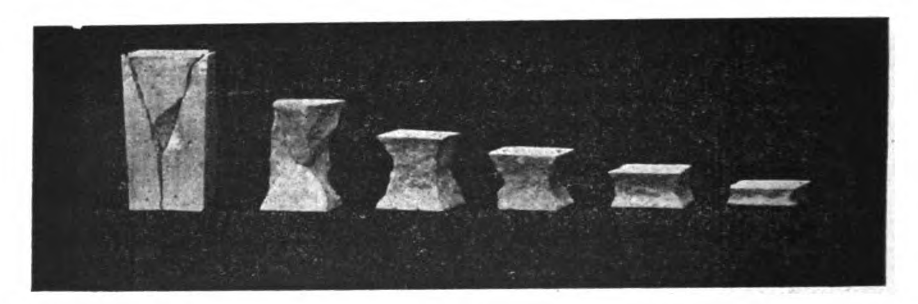


Fig. 68.

en plus plates, l'effort nécessaire pour désagréger les deux troncs de pyramide ou de cône augmente : à chaque addition de nouveaux poids, la matière s'écrase de plus en plus, sans toutefois céder complètement, et il devient très difficile de

[1] Dans les six essais cités par M. Siméon au tableau n° 2 de son rapport à la Commission des Méthodes d'Essai (vol. IV, p. 198), les résistances par centimètre carré déduites de l'écrasement de briquettes de traction (moyennes de 6 briquettes) dépassent de 30 pour 100 celles qui sont déduites de cubes de 7 × 7 centimètres écrasés de lit en lit (moyennes de 3 cubes).

dire à quel moment on doit la considérer comme rompue. En somme, quoique désagrégée, elle forme une masse capable de supporter des efforts presque infinis, par suite de l'impénétrabilité des grains qui la constituent et du peu d'espace qu'ils ont pour s'échapper latéralement. Tel est le cas des joints des maçonneries, qui, lorsqu'ils sont suffisamment minces, ne doivent inspirer aucune inquiétude tant qu'ils ne sont destinés qu'à subir des efforts de compression [1].

La figure 68 représente les solides obtenus par l'écrasement de prismes carrés de diverses hauteurs.

84. Cisaillement. — Dans le mémoire précité, M. Durand-Claye a étudié de près les phénomènes qui se produisent pendant l'essai par compression de pièces prismatiques et montré par le calcul que cet essai devait donner « la mesure de la résistance au cisaillement, c'est-à-dire aux efforts tranchants ».

Nous avons vérifié expérimentalement la proportionnalité

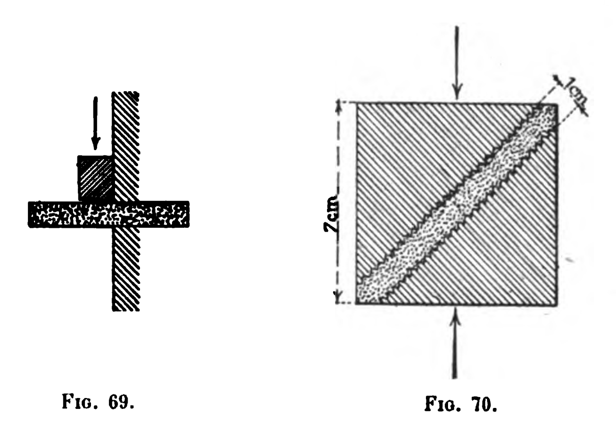


Fig. 69. Fig. 70.

des résistances à la compression et de celles au cisaillement et trouvé que, quel que fût le mortier essayé, l'effort total nécessaire pour rompre un prisme carré de 2 centimètres de

[1] Voir la note de M. Tourtay sur l'*Influence des joints dans la résistance à l'écrasement des maçonneries de pierre de taille. Annales des Ponts et Chaussées*, 1885, II, p. 582.

ctôé, comme l'indique la figure 69, était environ les deux tiers de la résistance à la compression par centimètre carré mesurée sur le même prisme placé en croix entre deux plaques d'acier de 2 centimètres de largeur [1].

De même, en essayant à la compression des cubes faits entièrement en mortier et d'autres dans lesquels le mortier n'occupait qu'une faible épaisseur suivant un plan diagonal (*fig.* 70), le reste étant du ciment pur plus résistant, de telle sorte que la rupture se produisit par cisaillement de la bande de mortier, nous avons constaté que, quelle que fût la composition de ce dernier, les efforts totaux nécessaires pour produire la rupture dans les deux cas étaient à peu près proportionnels et même presque égaux.

85. Poinçonnage. — Ce terme s'applique à des essais effectués sur des solides présentant deux faces planes parallèles dont l'une repose complètement sur un des plateaux de la machine, tandis que l'autre est pressée par un élément de plan ou poinçon de moindre surface que l'éprouvette.

La rupture comporte donc un cisaillement le long du contour du poinçon, puis l'écrasement du solide directement pressé, de sorte que l'effort à exercer pour la produire doit être en somme proportionnel au nombre qui mesure la résistance à la compression par centimètre carré.

Ces essais joindraient aux avantages de ceux par compression simple celui de ne pas exiger d'éprouvettes de dimensions rigoureusement exactes, pourvu seulement qu'elles présentent deux faces planes bien parallèles. Toutefois, il est à craindre qu'ils ne se trouvent influencés par les variations possibles de la composition du mortier dans le voisinage de la face poinçonnée.

Des expériences répétées sur un assez grand nombre de mortiers de compositions variées nous ont révélé les lois suivantes :

[1] Il convient toutefois d'ajouter que le dynamomètre qui nous a servi pour ces deux séries de ruptures n'était pas très exact et que, pour les mortiers les plus résistants, le rapport trouvé entre le cisaillement et la compression a été un peu plus faible que 2/3. La proportionnalité peut également être vérifiée au moyen des résistances rapportées par M. Bauschinger dans les fascicules VII et VIII de ses *Mittheilungen*.

Pour un poinçon donné et un type d'éprouvettes bien défini de forme et de dimensions, il y a proportionnalité entre la charge totale de rupture par poinçonnage et la résistance à la compression par centimètre carré[1].

Si l'on divise la première par la surface du poinçon, le nombre obtenu est plus grand que la seconde.

Le rapport de ces deux résistances ramenées à l'unité de surface varie avec la forme du poinçon ainsi qu'avec la dimension de l'éprouvette, alors même que la surface du poinçon reste constante.

Pour un même type d'éprouvettes et des poinçons de même forme, mais de dimensions croissantes, la charge totale de poinçonnage n'est pas proportionnelle à la surface des poinçons ; il semble qu'elle équivaille à l'effort total qu'il faudrait exercer pour rompre par compression ordinaire un bloc dont la section serait égale à celle de chaque poinçon augmentée d'une certaine constante ne dépendant que de la forme de ce dernier, mais nullement de sa surface[2].

Pour un même poinçon, la charge totale nécessaire pour produire la rupture augmente avec les dimensions horizontales de l'éprouvette, mais est indépendante de l'épaisseur de celle-ci tant que cette épaisseur reste supérieure à la largeur du poinçon. Pour des épaisseurs plus faibles, l'effort de rupture augmente et devient d'une observation de plus en plus difficile, comme dans les essais ordinaires par compression sur pièces plates.

Dans le cas le plus général, le poinçonnage se produit par la formation d'un cône ayant pour base la surface directement pressée par le poinçon et qui, formant coin, fait éclater la matière sous-jacente[3].

[1] En particulier, cette loi est vérifiée par les essais relatés au tableau IV du rapport de M. Siméon à la Commission des Méthodes d'Essai (vol. IV, p. 200).

[2] Nos expériences paraissent conduire, pour les demi-briquettes normales de traction (*fig.* 65) essayées au moyen de poinçons circulaires, à la formule :

$$\text{Charge totale de poinçonnage} = P\,(S + 1{,}77),$$

dans laquelle P représenterait la résistance à la compression par centimètre carré, et S la surface du poinçon exprimée en centimètres carrés.

[3] Bauschinger a donné (*Mittheilungen*, 6e fascicule) une formule permettant de calculer dans divers cas particuliers la charge de rupture par poinçonnage.

86. Comparaison des résistances à la traction et à la compression. — En résumé, tous les essais qui viennent d'être examinés peuvent être classés en deux groupes dans chacun desquels les divers modes d'application de l'effort conduisent, pour les résistances, à des nombres proportionnels entre eux, et comprenant, d'une part, la traction et la flexion, de l'autre, la compression, le cisaillement et le poinçonnage.

Quoi qu'on en ait dit bien souvent, il n'y a pas de rapport constant entre les résistances à la rupture par traction et par compression. Tout au plus peut-on observer une certaine proportionnalité approximative, quand on compare des mortiers toujours de même composition et d'âges voisins où entrent des produits analogues.

En réalité, pour des mortiers de plus en plus résistants, la compression progresse plus rapidement que la traction [1]. Il

De même, il a constaté que, quand un bloc était écrasé entre deux poinçons égaux et situés dans le prolongement l'un de l'autre, l'effort de rupture était le même que pour un prisme isolé ayant pour base la surface des poinçons et pour hauteur celle du bloc essayé, de sorte que la matière située dans le bloc en dehors de la projection des poinçons était sans influence. C'est ce que nous avons vérifié, de notre côté, dans un cas particulier, en trouvant les mêmes résistances pour des cubes essayés par compression et des prismes allongés à base carrée écrasés par leurs faces latérales entre deux plaques d'acier de largeur égale au côté de la base des prismes et placées en croix avec ces derniers.

[1] A titre d'approximation grossière, on peut dire que la résistance à la compression est à peu près proportionnelle à la puissance $\frac{3}{2}$ de la résistance à la traction. Aux longues périodes, la disproportionnalité peut être beaucoup plus marquée, ainsi qu'on en jugera par l'exemple suivant :

			Moyenne de	CIMENT A	CIMENT B	CIMENT C	CIMENT D
Résistances après 6 ans d'immersion à l'eau de mer (kg. par cm²)	Ciment pur.	Traction.	6 briquettes	33,7	37,8	33,4	16,8
		Compression.	2 cubes	510	390	268	105
	Mortier sableux normal.	Traction.	6 briquettes	35,2	33,4	29,4	28,3
		Compression.	2 cubes	313	210	137	79

On partagera notre confiance dans les essais par compression, à l'exclusion de ceux par traction, quand on saura que, le ciment A étant de la fine poussière de ciment portland passant au tamis de 4.900 mailles par centimètre carré, les ciments B, C et D n'étaient autres que des mélanges de 3/4, 1/2 et 1/4 de cette fine poussière avec 1/4, 1/2 et 3/4 de sable réduit en farine.



en résulte que le premier de ces essais permet de différencier les mortiers d'une manière plus nette que le second.

Il n'y a même aucune relation absolue entre les deux résistances ; autrement dit, deux mortiers différents ayant même résistance à la compression ne rompent pas nécessairement sous le même effort de traction, abstraction faite, bien entendu, des écarts d'expérience. Nous l'avons vérifié par un très grand nombre d'essais comparatifs faits sur des mêmes prismes rompus d'abord par flexion, puis dont les moitiés étaient essayées à la compression comme il a été dit plus haut. En particulier, le rapport de la traction à la compression est plus grand pour les mortiers de sable fin que pour ceux de gros sable.

Il est possible, toutefois, que cette absence de relation ne soit qu'apparente, par suite de l'hétérogénéité des éprouvettes au voisinage de leurs faces et de l'influence prépondérante de ces dernières dans les essais de traction et surtout de flexion. Peut-être trouverait-on que l'une des résistances est une fonction de l'autre, si l'on arrivait à s'affranchir de cette influence.

Quoi qu'il en soit, l'essai de compression nous paraît donner, mieux que tout autre, la mesure réelle de la cohésion des mortiers et devoir être préféré, au moins dans les expériences de recherche. Il fournit d'ailleurs des résultats généralement plus réguliers, surtout quand on opère sur des blocs un peu gros, dans lesquels les défauts locaux d'homogénéité des mortiers ont une moindre importance relative.

87. Relation entre la résistance d'un mortier et sa composition volumétrique élémentaire. — Le liant employé et les conditions de conservation restant les mêmes, les résistances de mortiers de diverses compositions dépendent, non seulement du poids de liant entrant dans un litre du mortier, mais aussi de la contexture de ce dernier; on peut s'en rendre compte par l'exemple suivant, dans lequel des mortiers contenant après gâchage la même proportion de ciment ont eu des résistances variant dans le rapport de 1 à 2,5.

Composition du mortier en poids	Poussière de ciment..	2,46	2,40	2,35	2,10	1,94	1,82	1,74	
	Sable très fin........	5,54	4,60	3,65	2,90	2,06	1,18	0,26	8
	Sable très gros.......	0	1	2	3	4	5	6	
Volume réel de ciment par litre de mortier........................		0,158	0,161	0,166	0,160	0,160	0,160	0,162	
Résistance à la compression par cm² atteinte après un an.........		70	77	96	98	121	160	180	

Comme d'ailleurs la composition volumétrique élémentaire d'un mortier à un instant quelconque de son durcissement dépend de celle qu'il présentait immédiatement après le gâchage, on peut se demander s'il n'y a pas une relation entre la résistance après une durée quelconque et les volumes élémentaires c, s, e, v, mesurés, pour le mortier frais, comme on l'a vu plus haut (art. 77).

A la suite de tâtonnements ayant porté sur un très grand nombre de séries de mortiers, nous avons reconnu la loi suivante :

Pour toute série de mortiers faits avec un même liant et des sables inertes, les résistances à la compression après une même durée de conservation dans des conditions identiques sont uniquement fonction du rapport $\frac{c}{e+v}$ *ou* $\frac{c}{1-(c+s)}$, *quelles que soient la nature et la grosseur du sable et les proportions des éléments, liant, sable et eau, dont chacun est composé.*

Pour vérifier cette loi, il suffit de représenter chaque mortier par un point ayant pour abscisse la valeur correspondante du rapport $\frac{c}{e+v}$ et pour ordonnée la résistance P fournie par l'essai. On constate que, pour chaque série de mortiers, tous les points sont sensiblement sur une même courbe.

Au contraire, si, avec les mêmes abscisses, on prend pour ordonnées les résistances T à la traction ou à la flexion, les points se séparent [1] ; on en conclut que la résistance à la

[1] En particulier, si l'on compare les résistances à la traction de mortiers plastiques faits avec diverses proportions d'un même liant et de différents sables, on constate qu'à chaque sable correspond une courbe distincte, d'autant plus écartée de l'axe des abscisses que le sable est plus fin.



oı

Nc
nc

ca
bt
ıte
ac
ati

ac

e
ort

P

e 1
no
vo
s s
or
ère
ei
nn
le

xi
l'e

ui
, e

M.
noi

La colonne 19 du tableau I donne les valeurs les plus probables de K caractérisant l'énergie des divers liants entrant dans les mortiers dont il vient d'être question[1].

Cette dernière formule permet, dans une certaine mesure, de calculer, en même temps que l'énergie propre K du liant pour un mode et une durée de conservation bien définis, la fraction de matière réellement attaquée qu'il contient au moment de l'essai. En effet, soit a cette fraction, de telle sorte que le volume absolu de matière réellement active contenu dans l'unité de volume de mortier soit ac : si l'on admet que le complément $(1-a)\,c$ joue le même rôle que du sable inerte, la formule devient :

$$P = K \left\{ \frac{ac}{1 - [s + (1-a)c]} \right\}^2.$$

Après remplacement au dénominateur de $1 - s - c$ par $e + v$, cette formule peut être transformée en la suivante :

$$a\sqrt{K}\,\frac{\left(\frac{c}{e+v}\right)}{\sqrt{P}} - a\,\frac{c}{e+v} = 1,$$

ou, en posant $\frac{c}{e+v} = x$ et $\frac{\left(\frac{c}{e+v}\right)}{\sqrt{P}} = y$:

$$a\sqrt{K}y - ax = 1.$$

Il en résulte que, si l'on calcule les valeurs de x et de y correspondant à chaque mortier et qu'on marque sur un

résistance à la traction était proportionnelle au rapport $\frac{c}{1-s}$, et conclure de là que la résistance à la compression devait être proportionnelle au carré de ce rapport. De nombreuses expériences que nous n'avons pas publiées confirment généralement la seconde de ces lois, mais infirment complètement la première.

[1] En adoptant la formule $P = 1350 \left(\frac{c}{1-s}\right)^2$ pour les résistances après 12 semaines des 80 mortiers étudiés dans notre note : *Essais de divers sables* (*Ann. des Ponts-et-Ch.*, 1896, II, p. 174), on calcule que l'écart moyen est de 16 kg., soit 14 pour 100 de la moyenne des 80 résistances fournies par l'expérience.



diagramme les points ayant ces valeurs pour coordonnées, les points qui correspondront ainsi à tous les mortiers d'une même série (même liant et mêmes conditions de conservation avant l'essai) devront se trouver en ligne droite.

On reconnaît qu'en réalité, dans bien des cas, il en est sensiblement ainsi ; on peut alors tracer au juger la ligne droite qui se rapproche le plus de tous les points fournis par les expériences, et déduire de ses paramètres les valeurs de K et de a. Toutefois, de faibles déplacements de cette droite entraînent de fortes variations pour ces deux coefficients, et il sera difficile de les calculer bien exactement tant que les méthodes d'essai ne seront pas devenues plus précises.

En somme, la résistance à la compression d'un mortier paraît être une fonction de trois paramètres K, a et $\frac{c}{e+v}$, dépendant surtout, le premier de la nature du liant, le deuxième de sa finesse et des conditions de conservation des éprouvettes, le troisième de la composition du mortier considéré.

Il semble résulter de deux séries d'essais échelonnés faits avec un ciment portland (21 mortiers distincts) et avec un ciment de laitier (11 mortiers distincts) conservés dans de l'eau de mer (ruptures faites après 4, 12, 26 semaines, 1 an, 2 ans et 4 ans) qu'on peut considérer K comme constant pour chaque produit, quel que soit l'âge des mortiers, tandis que a croîtrait proportionnellement à une certaine puissance de la durée de conservation.

Cette durée, mesurée en semaines, étant représentée par t, nous avons trouvé :

pour le ciment portland: $K = 2450$, $a = 0,419\ t^{0,135}$;
pour le ciment de laitier: $K = 1160$, $a = 0,377\ t^{0,182}$.

On déduit de ces nombres que les temps nécessaires pour que ces deux ciments aient produit tout leur effet ($a = 1$) sont respectivement de 629 et 213 semaines, soit un peu plus de 12 ans et de 4 ans, durées assez vraisemblables en raison de la différence de finesse des deux produits.

Si, admettant comme vérifiée la loi qui vient d'être entrevue dans ces deux exemples relativement à la constance de K et à la variation de a en fonction du temps, on pose :

$$a = a't^n \qquad \text{et} \qquad a' \frac{c}{e+v} = q,$$

la formule devient :

$$P = K \left(\frac{qt^n}{1 + qt^n} \right)^2.$$

Sous cette forme, elle montre notamment comment, pour un mortier donné (K, q et n ont alors des valeurs constantes), la résistance à la compression P serait liée à la durée de conservation t, à condition, bien entendu, qu'il ne survînt aucune action perturbatrice (expansifs, décomposition chimique, etc. [1]).

88. Conséquences de la formule au point de vue des essais. — Quelle que soit la formule à laquelle on s'arrête pour exprimer la résistance à la compression en fonction des volumes élémentaires, son adoption officielle permettrait de déduire d'essais faits sur un nombre très restreint de mortiers distincts les résistances de tous les mortiers qu'on peut obtenir avec un même liant.

Il ne serait pas nécessaire que les mortiers d'essai eussent une composition immuable, pourvu qu'on en mesure toujours exactement la composition volumétrique élémentaire.

Il conviendrait d'ailleurs d'opérer sur des mortiers plastiques, plus conformes aux conditions ordinaires d'emploi des produits hydrauliques que les mortiers normaux actuels, à peine mouillés et battus à outrance.

Mais l'avantage le plus important de pareilles recherches serait de fournir, pour chaque produit, un paramètre donnant une mesure absolue de son énergie spécifique, indépendamment de toute considération sur la nature et la composition des mortiers d'essai.

[1] Voir le renvoi de la page 345.

CHAPITRE VI

MORTIERS

§ 1. — Pâtes pures et coulis

89. Usages et propriétés générales. — Contrairement au plâtre, qui a la réputation de se lier mal avec le sable et est généralement gâché pur, les chaux et les ciments ne sont employés à cet état que dans un très petit nombre de cas spéciaux, notamment pour une action prompte et énergique (aveuglage de voies d'eau avec du ciment rapide), ou quand on désire des liants très plastiques et adhérant fortement aux matériaux adjacents. De pareils mortiers reviennent en effet fort cher et sont la plupart du temps moins durables que ceux dans lesquels des grains de sable forment, en s'arc-boutant entre eux, un squelette solide s'opposant aux retraits de la matière et aux fissures qui en seraient la conséquence.

Leurs résistances ne sont d'ailleurs guère supérieures à celles de mortiers sableux convenablement dosés ; elles peuvent même être notablement dépassées, si l'on a eu soin d'employer ces derniers avec peu d'eau et de les comprimer, opération à laquelle les pâtes ne se prêtent pas, en raison de leur plasticité.

C'est ainsi que, dans les essais normaux de chaux ou de ciments de laitier, on constate souvent de plus fortes résistances à la traction pour les mortiers 1 : 3 damés que pour les pâtes pures. Avec les portlands, il y a à peu près équiva-

lence entre les résistances du ciment pur et celles de mortiers contenant poids égaux de ciment et de sable.

Gâchés avec des proportions d'eau qui, suivant la nature et la finesse des poudres, peuvent varier de 20 à 50 pour 100 de leur poids et même plus, les liants qui nous occupent donnent des pâtes plastiques et onctueuses, surtout quand ils contiennent, comme les chaux et les ciments de laitier, une assez forte proportion de farine impalpable. Avec des quantités d'eau plus considérables, on obtient des boues plus ou moins liquides, qui reçoivent alors le nom de coulis. En raison de leur fluidité, ces coulis sont employés pour boucher des cavités sinueuses ou à orifice étranglé.

Après la prise et le départ de l'eau en excès, il reste une masse d'autant plus poreuse et moins résistante que la matière avait été délayée avec plus d'eau.

Un autre mode d'emploi du ciment pur, lorsqu'il s'agit de travaux qu'on est obligé d'exécuter sous l'eau, consiste à immerger des sacs de ciment en poudre, incomplètement remplis pour épouser la forme des corps voisins, et qui, sous l'action de l'eau pénétrant par capillarité, finissent par se transformer en de véritables enrochements. Cette pratique, fort coûteuse, utilise mal les propriétés du ciment et doit, autant que possible, être évitée.

De même, un procédé de fondation sous l'eau dans le sable consiste à insuffler dans ce dernier du ciment en poudre, qui s'interpose entre ses grains en formant une sorte de béton [1].

90. Rendement et composition volumétrique élémentaire des pâtes pures. — Le rendement des pâtes pures a été défini plus haut (art. 77). Gâché avec la proportion d'eau correspondant à la consistance normale (art. 70), 1 kilogramme de poudre donne, ainsi qu'on peut en juger d'après la colonne 4 du tableau II (p. 582), un volume de pâte d'environ :

[1] Procédé Neukirch décrit dans les *Annales des Ponts et Chaussées*, 1895, I, p. 108.

$0^L,730$ à $0^L,850$ pour les chaux hydrauliques ;
$0^L,630$ à $0^L,850$ pour les ciments à prise rapide ;
$0^L,640$ à $0^L,710$ pour les ciments de laitier ;
$0^L,570$ à $0^L,630$ pour les ciments naturels à prise lente et les portlands.

Pour des pâtes plus molles, le volume produit augmente à peu près proportionnellement au volume d'eau ajouté en plus.

Plus intéressante est, selon nous, la détermination de la composition volumétrique élémentaire, en ce qu'elle permet de calculer la plus grande valeur du rapport $\frac{c}{e+v}$ pour tous les mortiers plastiques dans lesquels on peut faire entrer un même produit..

Nous avons vu, en effet, que la résistance à la compression P, après une certaine durée de conservation dans des conditions bien définies, était une fonction croissante $P = Kf\left(\frac{c}{e+v}\right)$ de ce rapport.

La résistance d'un mortier de dosage donné, fait avec un sable donné, varie donc, suivant le liant, non seulement avec la valeur du coefficient K, qui caractérise l'énergie spécifique de chaque liant, mais aussi en raison de ce fait que, malgré l'égalité des dosages, le rapport $\frac{c}{e+v}$ varie aussi suivant les liants, par suite de leur différence de finesse et de densité et des proportions d'eau différentes qu'ils exigent, en sorte que, de deux mortiers de même dosage, celui dont le liant a la valeur de K la plus faible peut néanmoins être le plus résistant.

Or tous les composés hydrauliques peuvent être divisés en deux grands groupes comprenant, l'un les chaux hydrauliques et les ciments de laitier, l'autre les ciments proprement dits, et tels que, dans chacun d'eux, les valeurs du rapport $\frac{c}{e+v}$ correspondant à un mortier de composition bien définie varient à peu près proportionnellement aux valeurs qu'a ce même rapport pour les pâtes pures nor-

males [1]. Ces derniers nombres donnent donc une idée des valeurs relatives que prendra le rapport $\frac{c}{e+v}$ pour un même mortier fait avec divers liants du même groupe.

On constate d'ailleurs que deux liants pris dans l'un et l'autre groupe *et dont les pâtes pures normales ont la même valeur de* $\frac{c}{e+v}$ donnent, à dosage égal, des mortiers auxquels correspondent des valeurs de $\frac{c}{e+v}$ assez différentes, celle du mortier du groupe chaux-laitier étant la plus forte.

§ 2. — Mortiers à deux éléments solides

91. Importance d'une bonne composition. — Dans la grande majorité de leurs applications, les chaux et ciments sont additionnés d'une matière grenue qui communique au mélange une partie de sa dureté propre et en rend l'emploi plus économique. Ce cas comprend les mortiers de chaux et de pouzzolanes incomplètement pulvérisées et les mortiers proprements dits, presque exclusivement employés aujourd'hui, qu'on obtient en gâchant avec de l'eau des mélanges

[1] En prenant pour abscisses les valeurs de $\frac{c}{e+v}$ pour les pâtes pures, données par la colonne 8 du tableau II, et pour ordonnées les valeurs du même rapport pour le mortier particulier ayant donné lieu aux essais du tableau III, valeurs qui sont données par la colonne 4 de ce tableau, on trouve qu'on a à peu près :

pour le groupe des chaux et ciments de laitier :

$$y = 0,16x + 0,360,$$

et pour le groupe des ciments proprements dits :

$$y = 0,07x + 0,300.$$

En opérant de la même manière pour les valeurs de $\left(\frac{c}{1-s}\right)^2$ données par la colonne 9 du tableau II et par la colonne 5 du tableau III, on arrive encore, pour le mortier considéré, à peu près aux deux relations analogues :

$$y' = 0,20x' + 0,041 \quad \text{et} \quad y' = 0,11x' + 0,051.$$

intimes d'un liant plus ou moins hydraulique avec un sable naturel ou artificiel.

S'il est difficile de concevoir qu'un mauvais ciment puisse jamais donner un très bon mortier, par contre, le meilleur ciment peut donner un mortier excellent ou détestable, suivant la nature du sable qu'on lui mélange, suivant les proportions relatives des trois éléments, ciment, sable et eau, et aussi suivant la manière dont le malaxage est opéré.

Aussi ne doit-on pas, quand des accidents se produisent par suite de la mauvaise tenue des mortiers, incriminer nécessairement la qualité du produit avec lequel ceux-ci ont été fabriqués, les effets observés pouvant provenir uniquement d'un mauvais emploi de ce produit.

Il est donc d'un intérêt capital de rechercher l'influence des diverses causes qui peuvent agir, de manière à en déduire les meilleures conditions d'emploi des chaux et ciments.

Beaucoup d'expériences ont été faites dans ce sens; parmi les plus récentes, nous nous contenterons de mentionner celles de MM. Durand-Claye et Debray [1], de M. Candlot [2] et de M. Alexandre [3]. De notre côté, nous en avons fait aussi un certain nombre, que nous avons résumées dans un mémoire déjà cité [4], auquel nous emprunterons une partie des éléments du présent paragraphe, en renvoyant le lecteur aux pages où il pourra trouver plus de développements sur tel ou tel point particulier.

92. Composition granulométrique des sables. — Les sables naturels ou artificiels dont on peut avoir à faire usage pour la fabrication des mortiers sont composés d'un ensemble de grains dont les dimensions varient généralement entre des limites très écartées. Tant que les grains fins dominent, le mélange conserve le nom de sable ; si, au con-

[1] *Annales des Ponts et Chaussées*, 1888, I, p. 816.
[2] *Nouvelles Annales de la Construction*, 1889.
[3] *Annales des Ponts et Chaussées*, 1888, I, p. 375, et 1890, II, p. 277.
[4] *Sur la compacité des mortiers hydrauliques. Annales des Ponts et Chaussées*, 1892, II, p. 1. Se trouve aussi en brochure séparée à la librairie Dunod et Vicq, 49, quai des Grands-Augustins, à Paris.

traire, les gros grains se rencontrent en plus grande abondance que les fins, l'ensemble constitue ce que l'on appelle un gravier; enfin, il peut arriver que le sable ou le gravier contienne une proportion plus ou moins considérable de véritables cailloux.

La Commission des Méthodes d'Essai a réservé le nom de *sables* aux ensembles de grains passant à travers une tôle perforée à trous circulaires de 5 millimètres de diamètre.

Ainsi définis, les sables constituent encore des mélanges souvent fort complexes; en général, on se contente de les appeler gros, moyens ou fins, suivant les dimensions des grains prédominants, dénominations évidemment très vagues et incomplètes.

Dans les laboratoires, quand on se propose d'étudier l'influence de la grosseur du sable sur une propriété quelconque des mortiers, on emploie souvent des sables calibrés, c'est-à-dire débarrassés de tous les grains trop gros restant sur un tamis donné, de même que de tous les grains trop fins passant à travers un autre tamis un peu plus fin que le premier. En faisant varier progressivement la dimension des mailles, on obtient une série d'échantillons dont chacun est composé de grains sensiblement égaux entre eux, et auxquels on a tendance à comparer les différents sables de la pratique.

En réalité, la constitution de ces deux sortes de sables est essentiellement différente, et une pareille assimilation ne peut que conduire à des conclusions erronées (*loc. cit.*, p. 12).

Il importe, au contraire, de tenir compte de ce que nous avons appelé la *composition granulométrique* des sables, c'est-à-dire des proportions relatives des diverses grosseurs de grains dont ils sont formés.

Dans un rapport à la Commission des Méthodes d'Essai des Matériaux de Construction, nous avons montré (t. IV, p. 311) comment on pouvait définir complètement la composition granulométrique d'un mélange grenu quelconque, au moyen d'une courbe ayant pour abscisses les diamètres des trous de tôles perforées servant de tamis et pour ordonnées les poids de grains restant entre deux trous de diamètres

infiniment voisins, contenus dans l'unité de poids du mélange étudié.

Dans la pratique, il est rarement nécessaire de recourir à une description aussi rigoureuse, et on peut se contenter de séparer le sable en trois catégories de grains, appelés respectivement gros, moyens et fins, que la Commission a, sur notre proposition, fixées comme il suit :

Gros grains (G) : passant au trou de 5 mm. et retenus à celui de 2 mm. ;
Grains moyens (M) : passant au trou de 2 mm. et retenus à celui de $0^{mm},5$;
Grains fins (F) : passant au trou de $0^{mm},5$ de diamètre.

La composition granulométrique du sable est alors définie par les poids g, m et f de chacune de ces catégories de grains contenus dans l'unité de poids du mélange [1].

Dans le cas d'un sable brut contenant des grains qui ne traversent pas la tôle de 5 millimètres, on indique, en outre, la proportion pondérable de ces cailloux, exprimée aussi en fonction du poids du sable proprement dit.

Dans une longue série d'expériences entreprises en vue d'étudier l'influence de la composition granulométrique des sables proprement dits sur leurs principales propriétés et sur celles des mortiers dans lesquels ils entraient, nous nous sommes astreint à former un grand nombre de combinaisons méthodiquement échelonnées des trois grosseurs de grains élémentaires.

Mais, s'il était nécessaire d'examiner beaucoup de mé-

[1] Pour définir plus complètement la composition granulométrique, on pourrait subdiviser chacune des trois grandes catégories de grains en trois nouvelles grosseurs élémentaires définies comme il suit :

Catégories principales		G			M			F		
Subdivisions :		G*g*	G*m*	G*f*	M*g*	M*m*	M*f*	F*g*	F*m*	F*f*
Sable passant au trou de	mm :	5	4	3	2	1,5	1	0,5	(900)	(4.900)
et retenu par le trou de	mm :	4	3	2	1,5	1	0,5	(900)	(4.900)	»

Vu l'impossibilité de fabriquer des perforations exactes de moins de $0^{mm},5$ de diamètre, le sable F est subdivisé au moyen des toiles métalliques de 900 et de 4.900 mailles par centimètre carré déjà définies. L'échantillon médian M*m* n'est autre que le sable normal.

langes afin de ne laisser passer inaperçue aucune des particularités auxquelles pouvait donner lieu la variation progressive de leur composition granulométrique, en même temps il était à craindre qu'une trop grande multiplication des expériences ne compliquât fort la liste des résultats obtenus et n'en rendît l'intelligence bien difficile.

Nous avons triomphé de cette difficulté grâce à un mode particulier de représentation graphique des résultats (*loc. cit.*, pp. 17 à 22), dont nous n'indiquerons ici que le principe.

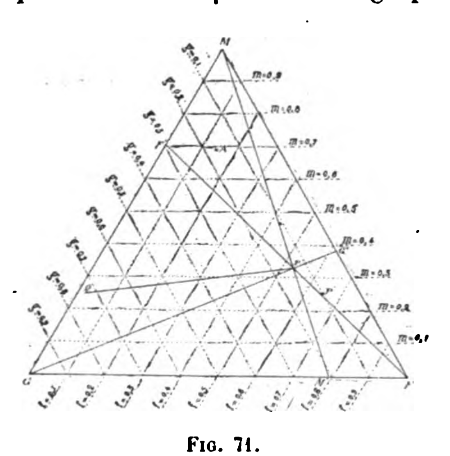


Fig. 71.

Dans un triangle équilatéral GMF (*fig.* 71), dont les sommets correspondent aux trois sables élémentaires, nous représentons un sable proprement dit de composition granulométrique g, m, f quelconque, par le centre de gravité P du système pesant obtenu en chargeant les sommets de poids respectivement proportionnels à g, m et f.

On a ainsi, entre les différentes longueurs de la figure, les relations :

$$\frac{PG'}{GG'} = g; \qquad \frac{PM'}{MM'} = m; \qquad \frac{PF'}{FF'} = f;$$

et les points se rapprochent d'autant plus de tel ou tel sommet du triangle que les sables qu'ils représentent contiennent une plus forte proportion de grains de la grosseur correspondante[1].

[1] Dans la figure, on a divisé les côtés du triangle en 10 parties égales et joint les points de division par des parallèles aux côtés. Il en est résulté 66 points d'intersection (y compris les trois sommets) représentant toutes les compositions granulométriques pour lesquelles g, m et f sont des multiples entiers de 0,1. Les cotes inscrites sur le prolongement des lignes permettent de lire immédiatement la composition granulométrique correspondant à chaque point de croisement.

En outre, le lieu géométrique des points représentatifs de tous les mélanges que l'on peut faire avec deux sables P et Q quelconques est le segment de droite PQ, les distances du point représentatif d'un mélange particulier aux deux extrémités de cette droite étant inversement proportionnelles aux poids des sables correspondants entrant dans le mélange.

Soit maintenant à rechercher comment varie, suivant la composition granulométrique du sable, une propriété quelconque de mortiers dont toutes les autres conditions de fabrication sont identiques: déterminons expérimentalement cette propriété pour un certain nombre de mélanges sableux et inscrivons le nombre qui la mesure auprès du point représentatif de chacun. Nous considérerons ces nombres comme les cotes de points de l'espace se projetant aux points correspondants du triangle et reliés entre eux par une surface continue dont la forme caractérisera la loi cherchée.

Grâce à cette introduction de l'idée de continuité dans les résultats obtenus, nous pourrons induire d'un nombre fini d'essais les propriétés du nombre infini des compositions granulométriques possibles, et, en outre, corriger les légères erreurs d'expérience commises dans les mesures relatives à chaque sable, au moyen des résultats trouvés pour les sables voisins, en déterminant une surface topographique régulière passant le plus près possible des divers points de l'espace résultant directement des expériences.

Nous représenterons cette surface en plan par les projections de lignes de niveau équidistantes, projections qui seront dès lors les lieux géométriques des points représentatifs de tous les sables pour lesquels la propriété étudiée est mesurée par un même nombre.

On trouvera plus loin diverses applications de ce procédé.

93. Poids d'un volume donné de sable[1]. — Le poids que l'on déduit, pour 1 mètre cube d'un même sable, du

[1] *Loc. cit.*, pp. 23 à 35.

poids trouvé en remplissant, dans des conditions toujours identiques de tassement, des mesures de capacité moindre, varie suivant les dimensions de ces mesures. En général, plus celles-ci sont profondes, plus le sable s'y tasse par l'effet de son propre poids, et plus est élevé le poids calculé pour 1 mètre cube.

A fortiori ce poids varie-t-il suivant la manière dont on verse le sable dans la mesure et dont on l'y tasse.

Enfin, le degré d'humidité du sable est un facteur non moins important, ainsi qu'en témoigne la figure 72 ci-dessous,

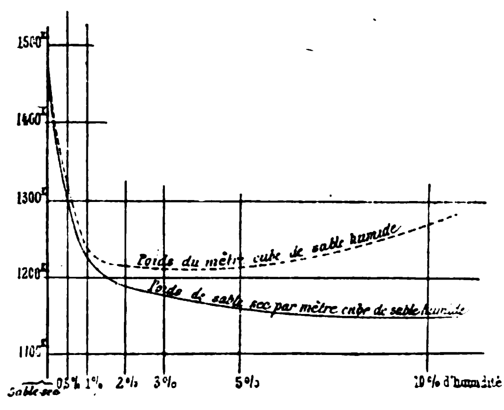


Fig. 72

qui indique les variations des poids trouvés en remplissant une même mesure, toujours de la même manière, avec du sable de dune de plus en plus humide. On constate toujours d'abord une diminution de poids, par suite de la difficulté qu'ont les grains humides à glisser les uns contre les autres, puis une augmentation, quand on dépasse un certain degré d'humidité. Dans l'exemple choisi, une proportion d'eau égale à 2 pour 100 du poids du sable a suffi pour abaisser le poids du mètre cube de 20 pour 100 de sa valeur initiale correspondant au sable parfaitement sec.

En faisant varier à la fois la capacité de la mesure employée, le mode de tassement et le degré d'humidité, nous avons trouvé que, pour le même sable de dune, le poids calculé de sable sec par mètre cube variait de 1.149 à 1.721 kilo-



grammes et le volume des vides, humidité comprise, de 57 à 35 pour 100 du volume apparent total.

Bien que les écarts eussent été moins considérables avec d'autres sables contenant une moindre proportion de grains fins, le fait seul qu'ils sont possibles montre combien il doit être difficile d'apprécier la qualité d'un sable d'après la proportion des vides qu'il contient, quand on le mesure d'une certaine manière, si bien définie qu'elle soit, mais nécessairement arbitraire.

Le mesurage du volume des vides, tel qu'on le pratique souvent en déterminant la quantité d'eau qu'on peut introduire dans un volume donné de sable, est d'ailleurs peu rigoureux, à cause des bulles d'air qui restent emprisonnées ; c'est ce qui fait qu'en général cette méthode conduit pour le sable à des poids spécifiques trop faibles. Il est plus exact de déterminer d'abord le poids spécifique du sable et d'en déduire, d'après le poids d'un volume donné de ce sable, le volume absolu occupé par la matière solide et, par différence, le volume des vides.

Mesurée dans des conditions identiques pour différents sables, la proportion des vides peut varier entre des limites assez écartées.

Pour des sables bruts résultant de l'addition de proportions croissantes de cailloux à un même sable proprement dit, elle va en diminuant, tant que les cailloux ne deviennent pas trop abondants, car ceux-ci, noyés dans la masse, remplissent de matière solide des espaces qui, sans eux, contiendraient des grains de sable séparés par des vides.

Pour des sables de même nature mais de compositions granulométriques différentes, on constate des écarts considérables : les sables composés de grains sensiblement égaux ont les plus fortes proportions de vides, qui sont à peu près indépendantes de la grosseur des grains ; parmi les sables plus complexes, ceux qui se serrent le plus ne contiennent pas de grains moyens : la proportion de gros grains et de grains fins correspondant au minimum de vides varie d'ailleurs suivant le mode de mesurage adopté. La figure 73

représente, suivant la méthode exposée à la fin de l'article 92, la variation du volume plein réel (complément du volume des vides) de mélanges en toutes proportions de trois sables élémentaires G, M, F, obtenus par mouture puis tamisage de quartzite de Cherbourg. Les mesures ont été faites en emplissant de sable bien sec et sans tassement une mesure carrée de 50 litres ayant une profondeur de $0^m,20$.

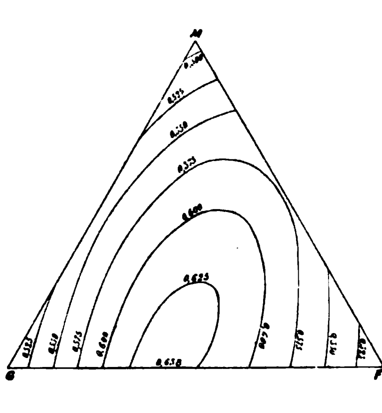


Fig. 73.

Pour des sables de même composition granulométrique, mais de natures différentes, le volume des vides est d'autant moindre que les grains sont de forme plus régulière et plus arrondie.

Les variations de la proportion des vides mesurée, pour des sables différents, dans des conditions bien déterminées, ne sont plus les mêmes, quoique obéissant à une même loi générale, quand on fait varier ces conditions. Aussi n'est-il pas possible de déduire *a priori* du vide trouvé pour un sable quelconque mesuré d'une certaine manière celui qu'il présenterait mesuré autrement. Les différences augmentent généralement avec la teneur du sable en grains fins.

94. Dosages d'étude. — Dans la pratique, on doit le plus souvent se contenter, du moins pour le sable, de mesures peu rigoureuses comme sont celles en volumes ; au contraire, dans les recherches de laboratoire, il importe au plus haut degré d'opérer sur des quantités de matières qui ne soient soumises à aucun aléa, de manière qu'un mortier quelconque puisse être toujours reproduit mathématiquement identique à lui-même. A ce point de vue, la pesée est le seul procédé recommandable.

De même, les dosages doivent être exprimés en poids et non traduits en volumes, car les conditions pratiques de cubage du sable, variables suivant les chantiers, ne peuvent correspondre qu'accidentellement avec la méthode normale du laboratoire, de sorte que des mortiers de même dosage nominal n'auraient pas la même composition de part et d'autre.

Il est souvent commode d'exprimer les dosages par le poids de chaux ou de ciment entrant dans l'unité de poids du mélange sec. En particulier, dans l'étude comparée de mortiers à différents dosages d'un même liant et d'un même sable, cette manière de faire permet de représenter graphiquement les propriétés de tous ces mortiers dans un même diagramme, établi sur une base de longueur 1, dont les extrémités correspondent au sable pur et au liant pur, de telle sorte que, les proportions de liant étant portées en abscisses sur cette base, les ordonnées soient proportionnelles aux nombres qui mesurent une même propriété des mortiers correspondants. On trouvera plus loin (*fig.* 74, 75, 76) diverses applications de ce mode de représentation.

On exprime généralement la proportion d'eau de gâchage par le poids d'eau employé pour un poids 100 de mélange sec.

95. Proportion d'eau correspondant à la consistance plastique[1]. — La quantité d'eau qu'il est nécessaire d'employer au gâchage pour que le mortier ait une bonne consistance plastique varie suivant le liant, la nature et la composition du sable et les proportions relatives de ces deux matières.

Pour des mortiers de dosage variable faits avec un même liant et un même sable, l'augmentation de cette quantité d'eau est, quand ce dernier est à gros grains, sensiblement proportionnelle à la teneur en liant ; dans la figure 74, établie comme il vient d'être expliqué, elle est alors représentée par une droite telle que GC, les ordonnées OG et 1C représentant les proportions d'eau nécessaires pour le

[1] *Loc. cit.*, pp. 35 à 50.

gâchage du sable pur et du ciment pur. Avec des sables fins, la loi est moins simple et représentée par une ligne telle que la courbe FC de la figure.

Pour des mortiers de même dosage faits avec un même liant et des sables de même nature, mais de diverses compositions granulométriques, le poids d'eau à prendre est sensiblement égal à la somme des produits des poids de chacune des trois grosseurs élémentaires de sable et du poids de liant par quatre coefficients constants, représentant les poids d'eau qui correspondraient à chacun de ces éléments employé pur.

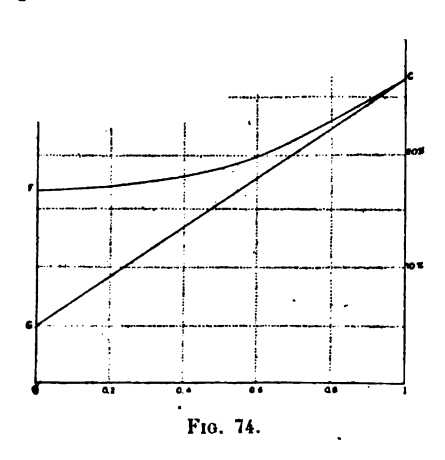


Fig. 74.

Pour des mortiers faits avec des sables de natures différentes, la proportion d'eau dépend, en outre, de la forme des grains et aussi, s'il y a lieu, de leur porosité.

En somme, il n'existe aucune loi simple permettant de prévoir, dans tous les cas, le poids d'eau nécessaire pour gâcher à bonne consistance plastique un mortier de composition quelconque. D'une manière générale, cette proportion croît avec la richesse en liant et avec la finesse du sable. Toutefois, si l'on se borne à comparer entre eux des mortiers dont les compositions ne présentent pas de trop grands écarts, on peut assimiler à une ligne droite la portion utile de la courbe FC, et dire que le poids d'eau se décompose approximativement en deux parties, l'une formée de l'eau nécessaire pour amener à l'état de pâte pure normale le poids de liant employé, l'autre destinée à mouiller le sable et proportionnelle à la surface totale de ses grains [1].

[1] En particulier, cette loi a été formulée, avec de légères corrections, par M. Cugnin (*Annales de la Construction*, 1881) et par M. Alexandre (*Annales des Ponts et Chaussées*, septembre 1890).

96. Influence de la proportion d'eau de gâchage sur les propriétés des mortiers. — D'une manière générale, le liant restant le même, la prise est d'autant plus lente que la proportion d'eau employée pour le gâchage est plus grande par rapport au poids de liant entrant dans le mortier. Cette loi ne s'applique pas seulement à des mortiers de même composition : elle continue d'être vraie, dans une certaine limite, quand on fait varier la proportion ou la nature du sable. Par exemple, la prise de mortiers également plastiques est d'autant plus lente qu'ils contiennent plus de sable et que celui-ci est plus fin [1].

La composition volumétrique élémentaire et plus spécialement la compacité $(c + s)$ d'un même mortier gâché avec des proportions d'eau croissantes varient suivant des lois différentes selon la composition granulométrique de ce mortier [2]. Quand les grains fins dominent, la somme $c + s$ décroît à peu près uniformément ; avec des mortiers très maigres à sable dépourvu de grains fins, elle reste presque constante ; enfin, dans les autres cas, elle commence par augmenter d'une manière souvent très marquée, passe par un maximum pour une consistance un peu plus sèche que la bonne consistance plastique, puis décroît d'une manière à peu près uniforme. En somme, quelle que soit la composition du mortier, pour toute addition d'eau au mortier plastique, on a sensiblement entre les volumes élémentaires $(c + s)$ et e la relation différentielle linéaire $d\,(c + s) = -\,\alpha\,de$, α étant un coefficient qui peut varier de 0 à un peu plus de l'unité suivant les cas (*loc. cit.*, pp. 69 à 73).

Pour tous les mortiers qu'on peut obtenir avec un même mélange solide plus ou moins mouillé, c est une fraction constante $\frac{1}{n}$ de la somme $c + s$; le rapport $\frac{c}{e + v}$, qui peut

[1] Voir notre rapport *sur la prise des mortiers sableux*. — Commission des Méthodes d'Essai, Vol. IV, p. 139.

[2] La composition granulométrique d'un mortier est celle du mélange de matières solides servant à l'obtenir, le liant étant compté parmi les grains fins. Pour tenir compte de la différence de densité du sable et du liant, il convient d'exprimer les proportions des trois grosseurs de grains, non plus en poids, mais en volumes absolus, quotients des poids par les densités.

alors s'écrire $\frac{1}{n}\frac{c+s}{1-(c+s)}$, variant dans le même sens que $c+s$, il en est de même de la résistance, que nous avons reconnue (art. 87) être une fonction croissante de ce rapport. L'expérience confirme qu'en effet, pour les mortiers où les grains fins dominent, et notamment pour les mortiers riches en liant, elle diminue constamment à mesure que la proportion d'eau augmente, tandis que, pour les autres, elle peut passer par un maximum pour une proportion d'eau un peu moindre que celle qui correspond à la consistance plastique.

On a vu plus haut (art. 54) que l'adhérence augmentait généralement avec la proportion d'eau de gâchage.

La perméabilité *initiale* d'un même mortier plus ou moins mouillé passe par un minimum souvent très marqué pour une proportion d'eau déterminée. Toutefois, les différences s'atténuent assez rapidement, par suite du passage de l'eau à travers les pores (art. 51 et *loc. cit.*, pp. 98 à 101). Nous n'avons d'ailleurs pu constater aucune loi bien nette relativement à l'influence de la proportion d'eau de gâchage sur la décomposition par filtration d'eau de mer.

En résumé, il semble qu'il y ait certains avantages à gâcher les mortiers avec des proportions d'eau relativement faibles. Toutefois, ces avantages n'existent qu'à la condition que les mortiers secs soient parfaitement serrés lors de l'emploi, ce qu'il n'est pas toujours facile d'obtenir sur les chantiers. Il est donc prudent d'y renoncer quand on n'a pas la certitude que cette prescription pourra être observée, et de rechercher une consistance suffisamment liée pour que le mortier soit d'un emploi commode.

97. Influence de la nature de l'eau de gâchage. — Il importe avant tout que l'eau employée pour le gâchage soit parfaitement limpide, les particules vaseuses ou organiques qu'elle contiendrait ayant une influence nuisible sur la liaison, la résistance et l'adhérence des mortiers.

En raison des différences de solubilité d'un même sel dans l'eau pure ou dans diverses solutions salines, les

matières dissoutes dans l'eau employée pour le gâchage doivent aussi modifier au moins la prise des mortiers hydrauliques. En particulier, la question de savoir si l'on doit préférer l'eau douce ou l'eau de mer pour le gâchage fait encore l'objet de nombreuses controverses.

Sauf dans quelques cas extrêmement rares, et qui correspondent d'ailleurs à des anomalies plutôt apparentes que réelles, la prise est toujours plus lente à l'eau de mer qu'à l'eau douce.

Pour certains produits, tels que les chaux et les ciments de laitier, la différence est généralement assez faible; pour les ciments proprement dits, elle varie, sans règle bien établie, suivant leur nature et leurs conditions d'emploi, et peut être considérable dans certains cas (voir tableau II, p. 582, col. 10 et 11).

Quant à toutes les autres qualités des mortiers : composition volumétrique élémentaire, porosité, perméabilité, résistance, adhérence, décomposition par l'eau de mer, elles sont sensiblement identiques, quelle que soit celle des deux eaux que l'on emploie.

En particulier, dans un très grand nombre d'essais de résistance faits sur des éprouvettes de même composition gâchées et immergées les unes à l'eau douce et les autres à l'eau de mer, et dont quelques-uns sont relatés au tableau III, page 584, nous avons constaté que les différences étaient tantôt dans un sens et tantôt dans l'autre, sans loi apparente, et ne dépassaient guère les erreurs possibles d'expérience. *A fortiori*, les résistances doivent-elles être identiques si, l'eau de gâchage variant seule, toutes les éprouvettes sont conservées dans le même milieu.

En somme, la durée de la prise doit être le seul guide à suivre pour le choix de l'eau de mer ou de l'eau douce, ce choix étant sans influence appréciable sur les autres propriétés du mortier mises en évidence par les expériences ordinaires de laboratoire. Toutefois, pour les mortiers destinés à être employés en enduits à l'air, l'usage de l'eau de mer ou, ce qui revient au même, de sables marins non désalés, doit être prohibé, car les sels hygrométriques que cette eau con-

tient sont la cause d'efflorescences qui dégradent les parements.

Ce n'est qu'exceptionnellement qu'on gâche les mortiers avec des solutions salines préparées à dessein. Nous examinerons ultérieurement (art. 116) l'action de quelques-unes, en même temps que les circonstances toutes spéciales auxquelles leur emploi est limité.

98. Influence de la richesse du mortier. — Les figures 75 et 76, établies comme il a été expliqué à l'article 94, indiquent la variation des principales qualités de tous les mortiers de bonne consistance plastique qu'on peut faire avec des proportions variables d'un même liant et d'un même sable. Dans l'exemple choisi, le liant est un ciment portland, et on s'est servi successivement de deux sables, l'un, que nous appellerons P, de composition granulométrique $g = 0{,}14$, $m = 0{,}33$, $f = 0{,}53$, dont les mortiers sont représentés par les traits pleins de la figure, l'autre Q, de composition granulométrique $g = 0{,}73$, $m = 0{,}25$, $f = 0{,}02$, auquel correspondent les traits pointillés (voir les positions des points P et Q dans la figure 71).

En construisant des diagrammes analogues pour divers liants et divers sables, on aperçoit les lois suivantes :

Quand on fait croître uniformément de 0 à 1 le poids de liant entrant dans un poids 1 de mélange sec, la proportion d'eau étant toujours déterminée de manière que le mortier soit bien plastique :

1° L'augmentation du volume réel de liant (c) entrant dans l'unité de volume de mortier est plus ou moins rapide, suivant la grosseur du sable et la richesse des mortiers.

2° Il en est de même de la diminution du volume réel (s) du sable.

3° Le volume d'eau (e) contenu dans l'unité de volume de mortier frais va en croissant.

4° Le volume total des vides du mortier frais (v) décroît, rapidement d'abord, puis plus lentement. Parfois il passe par un minimum voisin de zéro (voir courbes cotées $c + s + e$ sur la figure 75).

5° La compacité $(c + s)$ peut, suivant les sables, soit décroître d'une manière continue (le sable P est presque dans ce cas), soit commencer par croître, puis décroître après être passée par un maximum (sable Q). Si l'on ne considère que les mortiers aux dosages ordinaires, elle peut, quand leur richesse augmente sans sortir des limites de la pratique, soit croître sans interruption, soit, au contraire, aller toujours en décroissant, soit enfin croître d'abord, passer par un maximum et décroître ensuite.

6° Il en est de même du poids de l'unité de volume du mortier frais.

7° Le volume de mortier fourni par 1 mètre cube de sable croît avec une allure variable suivant la composition du mélange.

8° Il en est de même des résistances des mortiers au bout d'une même durée quelconque. En particulier, les résistances à la compression croissent d'abord assez lentement pour les mortiers extrêmement maigres, plus vite pour les dosages ordinaires de la pratique, puis de nouveau lentement pour les mortiers très riches.

9° Pour les dosages usuels, le prix d'un mètre cube de mortier[1] croît à peu près proportionnellement au poids de ciment entrant dans un poids 1 de mélange sec, mais avec une allure variable selon la nature des matières.

Nous avons, en outre, constaté (*loc. cit.*, pp. 103 à 106) que :

10° La perméabilité diminue rapidement à mesure qu'on

[1] Si l'on appelle δ et d les poids spécifiques du liant et du sable, φ et f les prix de 1.000 kilogrammes de liant et de sable rendus à pied-d'œuvre, et a le prix total de l'eau et de la main-d'œuvre correspondant à la fabrication de 1 mètre cube de mortier, prix qu'on peut considérer comme indépendant de la nature et des proportions des matières employées, le prix de revient F d'un mètre cube de mortier se déduit de la composition volumétrique élémentaire par la formule :

$$F = \delta c \varphi + d s f + a.$$

Dans l'exemple de la figure 76, on avait $\delta = 3{,}20$, $d = 2{,}65$ pour les deux sables, et on a supposé $\varphi = 60$ francs, $f = 3$ francs pour chacun des deux sables et $a = 3$ francs.

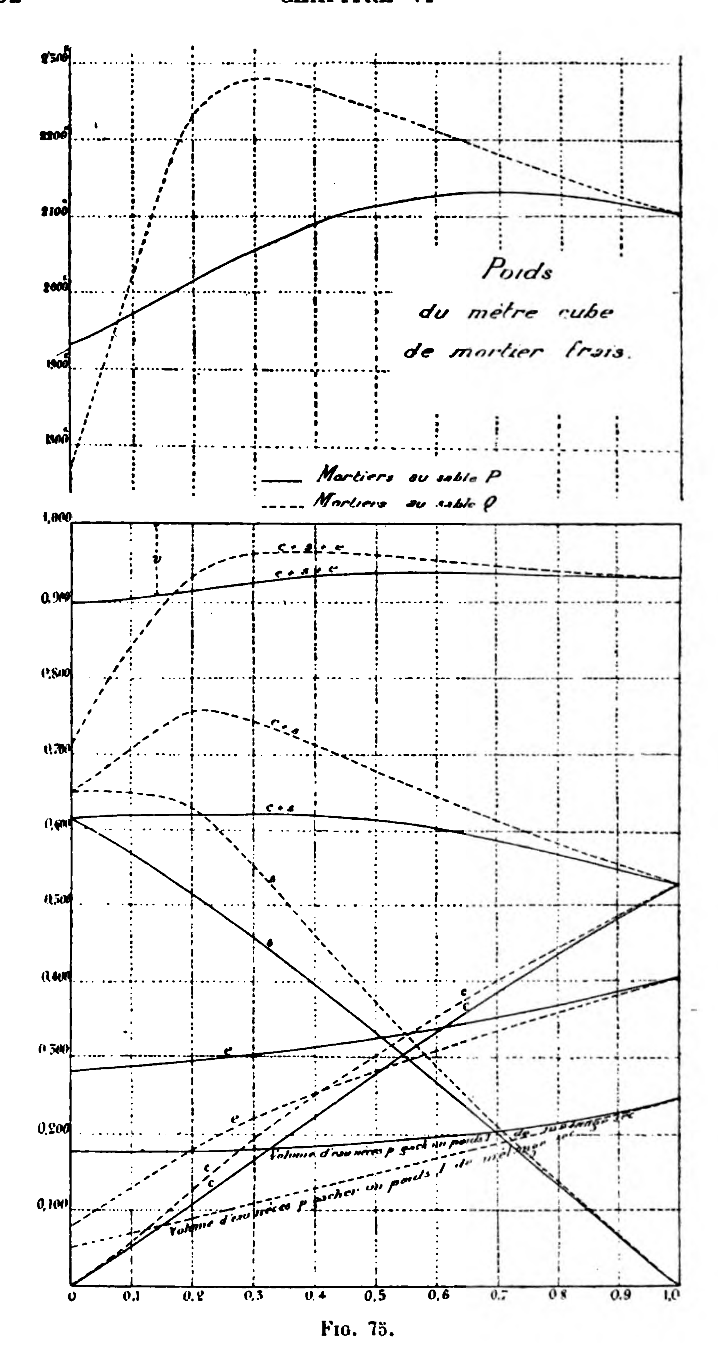

2300
2200
2100
2000
1900
1800
Poids
du mètre cube
de mortier frais.
Mortiers au sable P
Mortiers au sable Q
1,000
0,900
0,800
0,700
0,600
0,500
0,400
0,300
0,200
0,100
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1,0

Fig. 75.

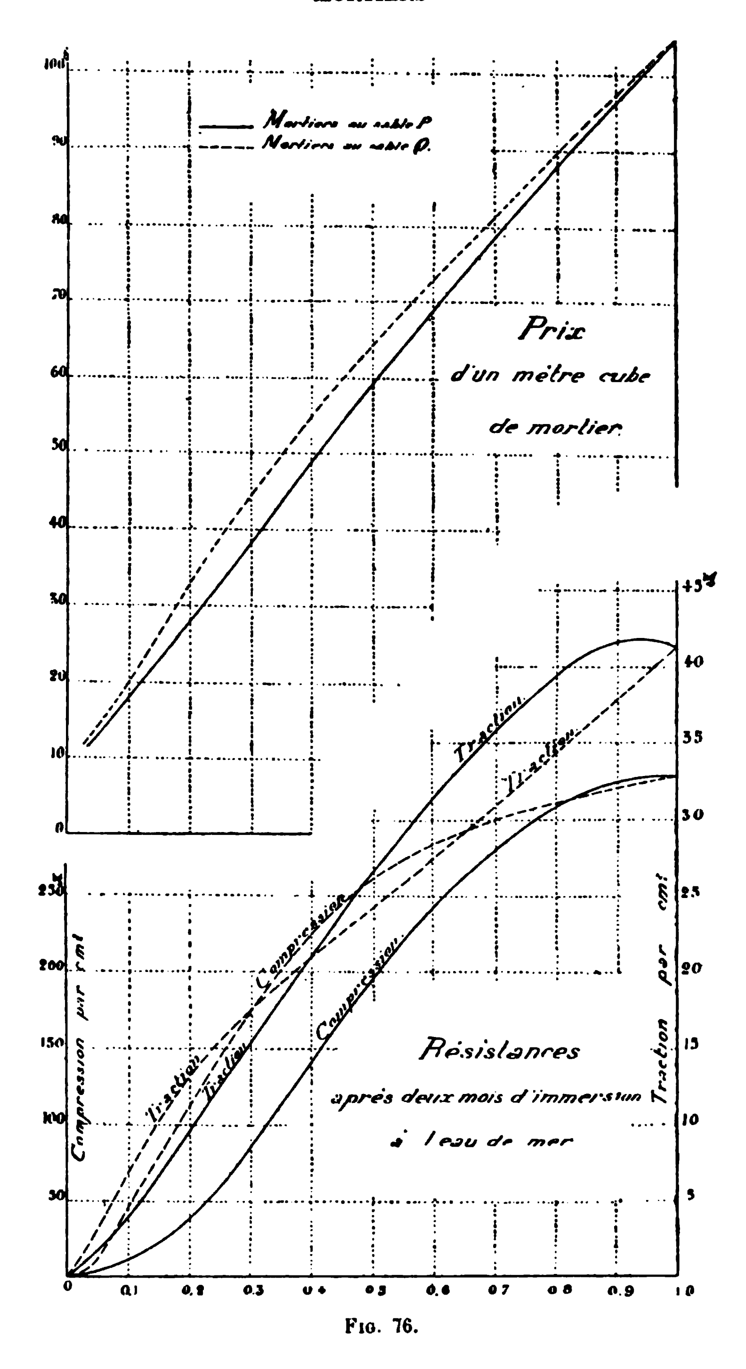

Mortiers au sable P
Mortiers au sable Q.
Prix
d'un mètre cube
de mortier
Résistances
après deux mois d'immersion
à l'eau de mer
Compression par cm²
Traction par cm²
Traction
Compression

Fig. 76.

augmente la proportion de liant combinée à un même sable.

11° La désagrégation par filtration d'eau de mer atteint son maximum pour les dosages moyens, et non pour les mortiers les plus maigres, sans doute parce que la quantité de liant entrant dans ces derniers ne peut fournir un volume de produits de décomposition suffisant pour obstruer les pores et les faire éclater.

Dans tous les cas, les valeurs absolues des nombres qui mesurent les diverses qualités dont il vient d'être question, oscillent entre des limites très écartées suivant le liant et le sable considérés, et doivent être déterminées par des expériences directes.

Cette restriction faite, on remarque que, si un certain nombre des propriétés énumérées varient suivant une loi bien définie à mesure que la richesse du mortier augmente, pour d'autres, au contraire, et notamment pour la compacité, il semble y avoir plusieurs lois absolument différentes. On verra plus loin qu'il n'en est rien et que, lorsqu'on tient compte des compositions granulométriques des sables, les divers phénomènes observés apparaissent comme les conséquences d'une loi générale unique.

99. Influence de la nature du sable. — En dehors de leur composition granulométrique, dont nous étudierons l'influence dans un article spécial, les sables peuvent différer par leur composition chimique ou minéralogique, par leur porosité et par la forme de leurs grains.

Des mortiers de même richesse et de même consistance faits avec un même liant et des sables de diverses natures présentent, la plupart du temps, des compositions volumétriques élémentaires assez différentes, même si l'on a eu soin d'amener les sables à avoir une même composition granulométrique.

Avec les sables non poreux, la compacité est d'autant plus grande que les grains sont de forme plus arrondie. Quant aux mortiers à sable poreux, ils exigent, pour être gâchés à la même consistance que les autres, des proportions d'eau plus fortes, et, en outre, le sable peut retenir plus ou moins

d'air dans ses pores, de sorte que finalement ils contiennent, par unité de volume, un moindre volume absolu de matières solides (*loc. cit.*, p. 74).

La comparaison des résistances est des plus délicates, précisément à cause de la difficulté d'obtenir, avec des sables de natures différentes, des mortiers qui soient à la fois de même richesse et de même compacité. Des essais, faits sur des mortiers obtenus en combinant en mêmes proportions pondérales un même ciment et divers sables amenés à avoir même composition granulométrique, nous ont donné, après une même durée de conservation, des résistances parfois assez différentes, mais ne présentant pourtant que d'assez faibles écarts, tant qu'on se bornait à l'emploi de sables usuels (*loc. cit.*, pp. 122 à 126).

Un mode de comparaison plus rigoureux consiste à faire quelques mortiers avec un même liant et chacun des divers sables à étudier, quelles que soient d'ailleurs les compositions granulométriques de ces derniers, et à calculer pour chaque mortier la valeur du rapport $\frac{c}{e+v}$. Les points ayant pour abscisses $\frac{c}{e+v}$ et pour ordonnées les résistances à la compression seront tous sur une même courbe si les sables sont inertes, mais s'écarteront de cette courbe, en dessus ou en dessous, pour les sables exerçant sur le liant une action chimique bienfaisante (pouzzolanique) ou nuisible.

Des essais de ce genre nous ont montré que la plupart des matières dont se composent généralement les sables de la nature étaient inertes. Il est à noter cependant que les calcaires durs paraissent augmenter un peu les résistances, moins toutefois que les matières connues pour être plus ou moins pouzzolaniques, telles que les briques ou les tuiles pilées, le trass et certains laitiers de hauts-fourneaux.

Encore ces matières, employées à l'état de sable grenu, n'augmentent-elles que faiblement les résistances des mortiers ; c'est seulement en poudre impalpable qu'elles peuvent exercer une action énergique, comme on le verra un peu plus loin (art. 109 et 111).

Les sables tendres doivent évidemment être écartés. Quant aux coquillages, tant qu'ils ne se rencontrent qu'à l'état de débris sans cavités et ne dépassant pas 5 à 10 millimètres, ils ne méritent pas le discrédit dans lequel on les tient souvent. Au contraire, ceux qui, en raison de leur forme en spirale, retiennent de l'air dans le mortier, doivent être assimilés aux grains de sable tendre et évités autant que possible.

En somme, sauf dans quelques cas assez rares, la nature du sable paraît être à peu près indifférente, et l'on doit rechercher, *à composition granulométrique égale*, les sables aux grains les plus arrondis, comme donnant des mortiers plus liés et plus compacts.

100. Influence de la composition granulométrique du sable. — Si l'on mélange à l'état de mortiers plastiques un même liant à des poids égaux de sables de même nature, mais de compositions granulométriques différentes, par exemple à des mélanges artificiels en proportions variées de trois sables élémentaires G, M, F, on constate les lois suivantes :

1° Le poids d'un même volume de mortier frais atteint ses plus petites valeurs pour les mortiers à sables uniformes (sommets du triangle de la figure 71) et augmente à mesure que le sable devient plus complexe, jusqu'à un maximum qui correspond à un certain mélange de gros grains et de grains fins sans grains moyens. La composition de ce sable, correspondant au maximum de densité du mortier frais, varie d'ailleurs suivant le dosage adopté.

2° Le volume d'eau contenu dans 1 mètre cube de mortier frais, minimum pour les mortiers à gros sable, croît en même temps que la proportion de grains moyens et surtout de grains fins et atteint son maximum pour les mortiers de sable fin.

3° La compacité suit une loi analogue au poids d'un volume donné de mortier frais. Son maximum correspond à un autre mélange sableux ne contenant pas de grains moyens.

4° Le poids de liant et le poids de sable entrant dans 1 mètre cube de mortier, de même que le prix total de ces deux matières, sont proportionnels à la compacité et, par suite, représentés par la même surface topographique avec simple changement des cotes.

5° Le volume des vides restant dans 1 mètre cube de mortier frais part d'un maximum pour les mortiers ne contenant pas de sable fin (à condition qu'ils ne soient pas très riches en liant) et décroît rapidement dès qu'il entre un peu de ce sable. A partir d'une certaine proportion de grains fins, le volume des vides est sensiblement constant et égal à environ 3 à 5 pour 100 de celui du mortier[1].

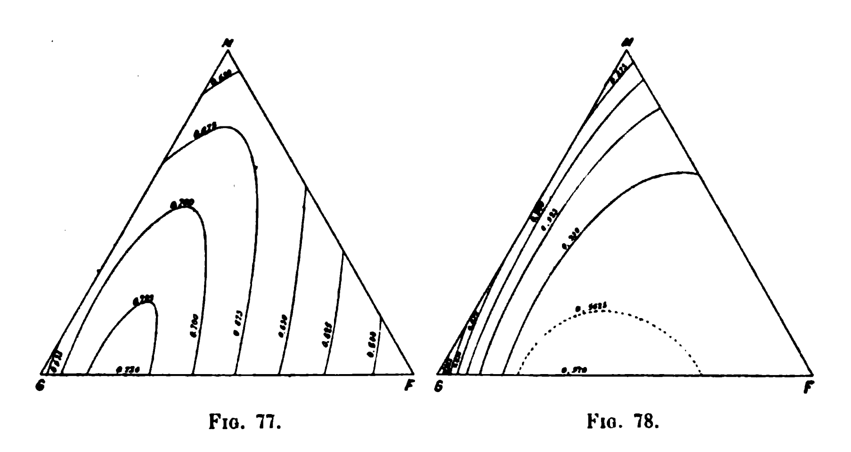


Fig. 77. Fig. 78.

Les figures 77 et 78 représentent la variation de la compacité ($c+s$) et du volume plein réel ($c+s+e$ ou 1-v) de mortiers frais contenant, en poids, 1 partie de ciment pour 3 parties de sables quartzeux moulus.

(Pour plus de détails sur ces cinq premiers points, voir *loc. cit.*, pp. 55 à 57.)

6° Les résistances après une même durée de conservation dans des conditions identiques sont les plus faibles pour les mortiers à sables réguliers ; dans ce cas, elles sont d'au-

[1] Il ne faut pas oublier que ce volume change avec le temps, tandis que la compacité reste très sensiblement constante.

tant plus faibles que les grains du sable sont plus fins. Elles augmentent rapidement à mesure que le sable devient plus complexe et atteignent leur maximum pour un mélange sableux, différent suivant la richesse du mortier, ne contenant pas de grains moyens. La loi est donc encore à peu près la même que celle qui a été formulée pour le poids du mètre cube (point 1°), mais avec cette différence que les écarts entre les valeurs extrêmes sont beaucoup plus forts. Par exemple, dans le cas d'essais de compression sur mortiers 1 : 3, les résistances peuvent varier du simple à plus du triple. Dans les essais de traction, les écarts sont un peu moindres (*loc. cit.*, p. 126).

7° La perméabilité varie à peu près de la même manière que le volume des vides (5e point) ; elle est la plus forte pour les sables sans grains fins et diminue rapidement dès que le sable contient un peu de ces grains.

8° La décomposition par l'eau de mer se produit diversement suivant la manière dont cette eau agit :

Pour des mortiers maigres de même dosage immergés dans une eau tranquille, la décomposition se produit surtout quand le sable ne contient pas de grains fins. Il faut, en effet, que les vides soient suffisamment larges pour que l'eau puisse s'y renouveler sans trop de difficulté.

Au contraire, dans le cas le plus général où il peut s'établir un courant d'eau à travers les mortiers, ceux-ci se décomposent d'autant plus rapidement, à dosage égal, que leur sable contient une plus forte proportion de grains fins (*loc. cit.*, pp. 106 à 115). On en a vu un exemple à l'article 58 ci-dessus.

On a vu plus haut (art. 93 et *fig.* 73) que les poids d'un même volume, mesuré dans des conditions identiques, de sables de compositions granulométriques variées, présentaient des différences assez importantes ; néanmoins, les lois qui viennent d'être formulées pour des mortiers dans lesquels le rapport du poids du liant à celui du sable reste le même, sont encore vraies (sauf pourtant le point n° 4) pour des mortiers obtenus en mélangeant un poids constant de

liant à un même volume de sable. Nous l'avons vérifié notamment dans une longue série d'expériences sur deux groupes de mortiers plastiques dosés à raison de 250 kilogrammes et de 500 kilogrammes de ciment par mètre cube de sables de compositions granulométriques méthodiquement échelonnées (*loc. cit.*, pp. 147 à 152 et *fig.* 43 à 82).

Les figures ci-dessous représentent les résistances à la compression par centimètre carré atteintes, après six ans d'immersion à l'eau de mer [1], par les mortiers à 250 kilogrammes (*fig.* 79) et par ceux à 500 kilogrammes (*fig.* 80). Parmi les premiers, ceux dont les sables correspondent au côté GM

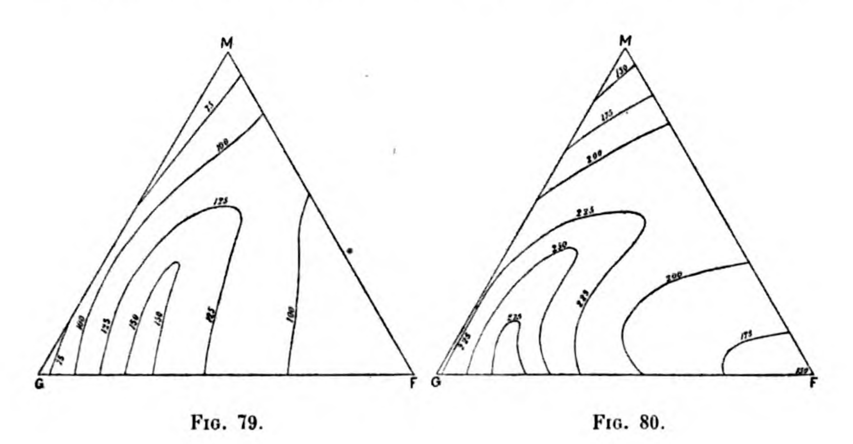


Fig. 79.

Fig. 80.

du triangle se sont désagrégés dès les premiers mois de l'immersion, et leurs voisins (faibles proportions de sable fin) se sont recouverts d'efflorescences plus ou moins accentuées. Les mortiers correspondants du second groupe se sont simplement tapissés de légers dépôts blancs, mais aucun ne s'est fissuré.

[1] Des blocs baignaient continuellement dans de l'eau de mer renouvelée toutes les semaines, tandis que d'autres étaient mis à sec tous les jours pendant plusieurs heures, puis recouverts de nouvelle eau de mer. Les uns et les autres se sont comportés sensiblement de même et ont donné, après six ans, des résistances très voisines dont on a pris les moyennes pour établir les deux diagrammes.

(Ces diagrammes ne figurent pas dans le mémoire de 1892.)

Le tableau ci-dessous indique les valeurs extrêmes constatées pour diverses propriétés des deux mêmes groupes de mortiers :

Poids de ciment par mètre cube de sable [1] :.... ....kg.	250	500
Rapport approximatif du volume du sable à celui du ciment :.................	6	3
Poids d'un mètre cube de mortier frais : kg.	de 1.722 à 2.205	de 1.933 à 2.218
Volume de mortier fourni par un volume 1 de sable :............................	de 0,940 à 1,030	de 0,970 à 1,180
Poids de ciment contenu dans un mètre cube de mortier :..... ....kg.	de 243 à 266	de 424 à 516
Compacité ($c + s$).........	de 0,570 à 0,737	de 0,565 à 0,728
Volume des vides restant, après séchage, dans un volume 1 de mortier..........	de 0,145 à 0,330	de 0,093 à 0,210
Décomposition par l'eau de mer après 6 ans d'immersion..................	Tous les degrés, y compris l'absence totale de désagrégation	Aucune désagrégation
Résistance à la compression par centimètre carré après immersion d'un an à l'eau douce :......................kg.	de 35 à 130	de 100 à 260

Ce tableau montre d'une manière frappante combien peuvent varier les propriétés de mortiers de même dosage faits avec un même liant et des sables de même nature ne différant que par leurs compositions granulométriques.

Il prouve par là même que *la simple indication du poids de liant employé par mètre cube de sable ne peut donner aucune idée de la qualité du mortier, si l'on ne définit pas exactement la composition du sable.*

Tel mortier à 300 kilogrammes de ciment par mètre cube de sable peut être meilleur que tel autre à 600 kilogrammes, le ciment étant le même.

La méthode que nous avons appliquée pour faire varier la composition granulométrique des sables, et qui consiste à former des mélanges en proportions échelonnées de trois sables élémentaires de grosseurs différentes bien définies,

[1] Proportions calculées en poids en adoptant pour poids du mètre cube des sables ceux qui sont donnés par la figure 73 ci-dessus.

ne permet de reproduire que d'une manière approximative toutes les compositions granulométriques possibles, car elle ne prévoit pas les variations de la composition granulométrique de chacun des sables élémentaires.

Mais cette influence, de même que celle de la forme des grains, est faible en comparaison de celle des proportions des trois principales subdivisions du sable [1]. Néanmoins, on ne doit pas trop s'attacher aux valeurs absolues des nombres qui viennent d'être cités, valeurs qui diffèrent suivant la nature des liants et des sables. Par contre, l'allure générale des courbes reste sensiblement la même.

101. Variation simultanée de la composition granulométrique du sable et de la proportion du liant. — On pourrait, par une construction analogue à celle qui vient d'être employée pour étudier l'influence de la composition granulométrique seule, représenter tous les mortiers de divers dosages faits avec un même liant et des mélanges variés de trois sables élémentaires G, M, F, par des points d'un tétraèdre dont les sommets correspondraient au liant et aux trois sables. Les lieux géométriques des points représentatifs de tous les mortiers jouissant à un même degré

[1] On en jugera par l'expérience rapportée par le tableau ci-dessous, dans laquelle un même liant a été associé à des poids égaux de sable G et de sable F, chacun de ces sables ayant une composition granulométrique différente. Les sables subdivisionnaires désignés par les lettres G*g* à F*f* ont été définis dans le renvoi de la page 439.

Composition des mortiers en poids	Liant : .....6...........		6	6	6	6	6	6	6
	Sable G : ...6........	G*g*	4	1	1	2	2	2	2
		G*m*	1	4	1	2	2	2	2
		G*f*	1	1	4	2	2	2	2
	Sable F : ....6........	F*g*	2	2	2	2	4	1	1
		F*m*	2	2	2	2	1	4	1
		F*f*	2	2	2	2	1	1	4
Eau employée pour le gâchage....... p. 100.			14,4	14,5	14,5	14,7	13,5	14,2	16,5
Poids du mètre cube de mortier frais..... kg.			2159	2145	2136	2142	2171	2151	2104
Compacité $(c + s)$..............................			0,745	0,741	0,737	0,738	0,753	0,743	0,720
Résist. à la comp. par cm^2 après 1 an.....kg.			149	148	144	148	163	145	139

d'une propriété quelconque seraient alors des surfaces de niveau dont on pourrait déterminer les traces sur les faces du tétraèdre et sur des plans auxiliaires judicieusement choisis. Mais un pareil mode de représentation serait d'une application peu pratique, qui ferait disparaître en grande partie les avantages ordinaires des méthodes graphiques.

Pour l'étude des différents problèmes concernant la répartition des vides et des pleins, dans lesquels l'énergie propre du liant n'a pas à intervenir, la question se trouve simplifiée si l'on assimile les grains plus ou moins fins du liant à des grains de sable de même grosseur, en négligeant les faibles variations de volume plein réel résultant de la dissolution de certains éléments du liant et de la formation de nouveaux groupements chimiques dans les mortiers encore jeunes.

Des expériences directes nous ont d'ailleurs confirmé que, bien qu'en général les liants soient plus fins et exigent plus d'eau que la moyenne des grains F des sables, la compacité et le volume des vides d'un mortier frais ne subissent que des variations assez faibles quand on remplace du sable fin par un égal volume absolu de liant ou inversement (*loc. cit.*, pp. 57 à 62).

Il suffira donc de faire intervenir la composition granulométrique du mélange sec employé à la fabrication du mortier, ce mélange étant encore décomposé en gros grains G, grains moyens M et grains fins F′, définis comme précédemment, mais dont les derniers comprendront à la fois le sable fin et le liant [1].

Sans doute, on n'obtiendra qu'une approximation assez grossière, mais elle suffira néanmoins à donner une idée nette des lois générales cherchées.

A fortiori, ces lois seront-elles indépendantes de la nature du liant employé.

Les figures 81 et 82, dans lesquelles le sommet F′ correspond à l'ensemble du sable fin et du liant, indiquent les variations des sommes $c + s$ et $c + s + e$.

[1] Vu la différence de densité de ces deux matières, il conviendra d'exprimer la composition granulométrique d'un mortier par les volumes absolus des trois catégories de grains entrant dans un volume absolu 1 du mélange.

On voit que la compacité, minimum pour les sommets du triangle, atteint son maximum d'environ 0,734[1] pour les mortiers de composition granulométrique : $g = 0{,}6$; $m = 0$; $f' = 0{,}4$ (point N du diagramme).

Quant au volume plein réel $(c + s + e)$ du mortier frais,

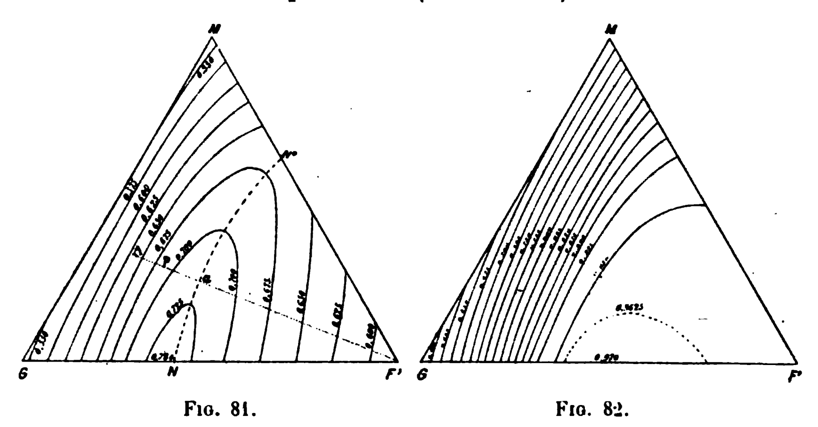


Fig. 81. Fig. 82.

très faible pour le sommet G et le côté GM, il croît rapidement quand la proportion des grains F' augmente et arrive, quand cette proportion atteint environ 0,35, à ne plus différer de l'unité que d'environ 0,050. La surface topographique se termine par une sorte de plateau dont le point culminant est situé dans le voisinage du milieu du côté GF'.

Deux problèmes vont montrer le parti qu'on peut tirer de ces diagrammes.

Premier problème. — Déterminer la composition volumétrique élémentaire d'un mortier plastique dosé à raison de C kilogrammes de liant et S kilogrammes[2] d'un sable de poids spécifique d et de composition granulométrique g, m, f $(g + m + f = 1)$.

[1] Cette valeur résulte d'expériences faites avec un ciment portland et du sable quartzeux moulu. Pour d'autres matériaux, elle pourrait être un peu différente.

[2] On ramènerait à ce problème le cas où on indiquerait le poids de ciment employé par mètre cube de sable, en déterminant expérimentalement le poids d'un mètre cube de sable mesuré comme sur le chantier.

Soit δ le poids spécifique du ciment dans l'eau :

C kilogrammes de liant auront pour volume absolu $\frac{C}{\delta}$;

S kilogrammes de sable auront pour volume absolu $\frac{S}{d}$, se décomposant en

$$\frac{Sg}{d}, \qquad \frac{Sm}{d} \qquad \text{et} \qquad \frac{Sf}{d}.$$

Les proportions de grains G, M et F′ entrant dans le mélange seront donc respectivement :

$$g' = \frac{\left(\frac{Sg}{d}\right)}{\left(\frac{C}{\delta} + \frac{S}{d}\right)}; \qquad m' = \frac{\left(\frac{Sm}{d}\right)}{\left(\frac{C}{\delta} + \frac{S}{d}\right)} \qquad \text{et} \qquad f' = \frac{\left(\frac{Sf}{d} + \frac{C}{\delta}\right)}{\left(\frac{C}{\delta} + \frac{S}{d}\right)}.$$

Dès lors il suffira, pour connaître les valeurs de $c + s$ et de $c + s + e$ relatives à ce mortier, de déterminer dans les triangles des figures 81 et 82 le point représentatif de cette composition granulométrique et de lire les cotes correspondantes.

Si V et V′ sont ces cotes, on aura, pour calculer les quatre grandeurs c, s, e et v qui définissent la composition volumétrique élémentaire du mortier, les quatre équations suivantes :

$$c + s + e + v = 1,$$
$$c + s = V,$$
$$c + s + e = V',$$
$$\frac{c}{s} = \frac{\left(\frac{C}{\delta}\right)}{\left(\frac{S}{d}\right)}.$$

On pourra de même calculer $\frac{c}{e + v}$ ou toute autre fonction des quatre volumes élémentaires.

Il est à remarquer que le poids C de liant a même volume

absolu qu'un poids $C' = \frac{d}{\delta} C$ de sable, de sorte que le mélange d'un poids S de sable et d'un poids C de liant aura même composition granulométrique que celui d'un poids S de sable avecun poids C′ de sable fin et sera représenté par un point P de la droite joignant le point représentatif A du sable considéré au sommet F′ du triangle (*fig.* 81), la position exacte du point P étant définie par l'égalité : $\frac{AP}{PF'} = \frac{C'}{S}$.

Deuxième problème. — Déterminer comment varie la composition volumétrique élémentaire de tous les mortiers plastiques qu'on peut obtenir en mélangeant en diverses proportions un même liant et un même sable de composition granulométrique connue.

Il résulte de la remarque qui précède que le lieu géométrique des points représentatifs de ces mortiers ne sera autre que la droite AF′. On aura donc la représentation graphique des variations étudiées, en déterminant la section des surfaces topographiques correspondant aux figures 81 et 82 par un plan vertical ayant pour trace la droite AF′.

On obtiendra ainsi des courbes analogues aux courbes donnant $c + s$ et $c + s + e$ dans la figure 75, avec cette différence que, la longueur AF′ étant prise pour unité, les abscisses seront égales aux volumes absolus de liant entrant dans un volume absolu 1 de mélange sec. Pour en déduire les proportions en poids, il suffira de multiplier les volumes absolus par les poids spécifiques δ et d.

L'examen de la figure 82 montre que, quand on considérera des mortiers de plus en plus riches, la somme $c + s + e$ commencera par être d'autant plus faible que le sable considéré contiendra moins de grains F, puis ira en augmentant jusqu'à ce que le mortier atteigne une certaine richesse, à partir de laquelle $c + s + e$ se maintiendra d'une manière à peu près constante à une valeur assez élevée. Plus le sable contiendra de grains F, moins il sera nécessaire de lui incorporer de liant pour arriver à ce résultat.

Quant aux variations de la compacité, elles obéiront à une loi plus complexe.

Pour nous en rendre compte, déterminons sur la figure 81 la courbe NaN′, lieu géométrique des points de contact des tangentes menées du point F′ aux projections de toutes les lignes de niveau qu'on peut supposer tracées sur la surface topographique. Au point a, intersection de cette courbe et de la droite AF′, correspondra un maximum de la courbe obtenue en coupant la surface par le plan vertical AF′. Par suite, tant que le rapport du poids de liant au poids de sable restera inférieur à $\frac{\delta \times Aa}{d \times aF'}$, la somme $c + s$ croîtra en même temps que la richesse du mortier ; pour cette valeur, elle passera par un maximum, puis elle ira en décroissant à mesure que la richesse du mortier augmentera davantage.

Dès lors, la courbe NaN′ permettra de classer tous les sables en deux catégories, suivant que leur point représentatif sera dans la portion GNN′M ou dans la portion NN′F du triangle.

Avec les premiers, la compacité passe par un maximum pour une certaine proportion de liant ; c'est le cas du sable Q étudié plus haut (*fig.* 75). Avec les autres, au contraire, la compacité diminue constamment à mesure que le mortier devient de plus en plus riche ; c'est presque le cas du sable P. Il peut alors être bon, dans une certaine mesure, de ne pas faire de mortiers trop riches.

102. Lois générales. — La courbe NaN′ s'écarte très peu d'une parallèle au côté GM menée par le centre de gravité du triangle, ligne qui correspond à $f = \frac{1}{3}$; d'autre part, la figure montre que la compacité va en augmentant quand on suit la courbe de N′ vers N. On peut donc formuler les lois suivantes :

a) Pour tous les mortiers de bonne consistance plastique faits avec des sables contenant au moins un tiers de leur poids de grains fins, la compacité est d'autant plus faible que le mortier est plus riche en liant.

b Parmi tous ceux qu'on peut obtenir avec un même liant et un sable déterminé contenant au plus un tiers de son poids

de grains fins, le plus compact est celui dans lequel le volume absolu des grains fins, liant compris, est égal à la moitié du volume absolu des gros grains et des grains moyens réunis.

Le maximum de compacité est d'ailleurs d'autant plus fort que les gros grains sont plus abondants par rapport aux grains moyens.

Des expériences étendues à d'autres grosseurs de grains (*loc. cit.*, pp. 153 à 156) nous ont permis de généraliser cette seconde proposition et d'énoncer les lois suivantes, s'appliquant. quelle que soit la définition admise, pour les trois grosseurs élémentaires :

1° *Les mortiers plastiques qui, par unité de volume, contiennent le plus grand volume absolu de matières solides* ($c + s$), *sont ceux dans lesquels, les grains moyens faisant défaut, les gros grains se trouvent à peu près*[1] *en proportion double des grains fins, liant compris.*

2° *Quand cette condition est réalisée, la valeur de* $c + s$ *est d'autant plus grande qu'il y a plus d'écart entre les dimensions des deux catégories de grains (gros et fins) entrant dans le mortier.*

103. Mortiers de sable fin. — Il ressort de tout ce qui précède, et notamment de cette dernière formule, que les sables fins donnent, en général, des mortiers de qualité tout à fait inférieure.

C'est là un principe d'une grande importance et dont la non-observation a eu maintes conséquences désastreuses.

On peut mettre en évidence la supériorité des mortiers de gros sable sur ceux de sable fin, même lorsque ceux-ci sont beaucoup plus riches que les premiers, en déterminant les résistances de mortiers plastiques à dosages échelonnés faits avec un même liant et deux sables de grosseurs différentes, et déduisant par interpolation les dosages qui correspondraient à des résistances données.

Le tableau ci-contre, obtenu de cette manière, et dans

[1] La proportion varie un peu suivant la grosseur et la forme des gros grains. Il est donc bon de la déterminer expérimentalement, dans chaque cas particulier, pour la consistance adoptée et les matériaux dont on dispose.

Résistance à la compression par centimètre carré après immersion de 5 mois à l'eau de mer		25	50	75	100	150	200	250	300	350	485
Poids de ciment qu'il aurait fallu mélanger à un mètre cube de sable pour obtenir les résistances correspondantes	sable fin kg	231	403	544	670	950	1345	1900	2645	4030	ciment pur
	gros sable kg.	120	182	251	320	437	559	725	980	1635	
Volume de sable entrant dans un mètre cube de mortier......	sable fin m³.	0,980	0,900	0,839	0,800	0,714	0,624	0,527	0,432	0,321	0
	gros sable m³.	1,050	1,040	1.025	1,010	0,965	0,920	0,857	0,773	0,602	
Poids de ciment entrant dans un mètre cube de mortier.......	sable fin kg.	226	362	437	535	679	838	1000	1142	1293	1722
	gros sable kg.	126	189	257	321	422	513	620	756	985	
Prix total du sable et du ciment entrant dans un mètre cube de mortier......................	sable fin fr.	15,03	23,07	28,68	33,30	41,81	51,22	60,79	69,17	78,06	103,32
	gros sable fr.	18,06	21,74	25,67	29,36	34,97	39,98	45,77	53,09	65,12	
Compacité..........................	sable fin	0,616	0,611	0,608	0,608	0,610	0,610	0,607	0,601	0,593	0,553
	gros sable	0,702	0,717	0,729	0,737	0,743	0,743	0,739	0,724	0,687	

lequel on a calculé le prix de revient d'un mètre cube de chaque mortier, montre que, pour l'exemple choisi, les poids de ciment à prendre par mètre cube de sable fin auraient été plus que doubles de ceux qu'il aurait fallu mélanger au gros sable pour obtenir les mêmes résistances, de sorte que, même en supposant le gros sable beaucoup plus cher que le fin, son emploi aurait été encore plus économique, tout en présentant une plus grande sécurité.

On a choisi comme sable fin du sable de dune, ne contenant qu'une proportion insignifiante de grains retenus par la tôle à trous d'un demi-millimètre, et comme gros sable le sable Q dont il a été déjà question. On a supposé que, sur le chantier, ces sables pesaient par mètre cube 1.460 et 1.670 kilogrammes, nombres déduits d'expériences de laboratoire, et que leurs prix à pied d'œuvre étaient respectivement de 1fr,50 et de 10 francs par mètre cube, celui d'une tonne de ciment étant de 60 francs.

Il serait difficile d'établir un tableau analogue qui fût basé sur l'équivalence des mortiers au point de vue de leur aptitude à lutter contre l'action décomposante de l'eau de mer. L'importance des différences signalées plus haut (art. 58) entre les décompositions de mortiers de même dosage, différences bien plus accentuées encore que celles des résistances, permet de croire qu'un pareil tableau établirait encore plus nettement que le précédent l'infériorité des mortiers de sable fin, même relativement riches.

La conclusion générale de ces diverses observations est que, si, dans une région, on n'a à sa disposition que du sable fin, comme est par exemple celui des dunes ou de certaines carrières, on ne devra pas craindre de s'en procurer un autre, même à un prix élevé, soit qu'on le fasse venir ou qu'on le fabrique en concassant des pierres : cette solution sera presque toujours plus avantageuse, au double point de vue de la sécurité et de l'économie, que celle qui consisterait à mélanger une plus forte proportion de ciment au sable fin qu'on a sous la main.

104. Mortiers de sable brut. — Le fait signalé plus

haut que, pour les sables bruts, le poids du mètre cube augmente avec la teneur en cailloux tant que ces derniers ne sont pas en proportion prédominante, semble impliquer que des mortiers obtenus en combinant un même poids de liant à un même volume de sable doivent être d'autant plus maigres que le sable contient plus de cailloux.

Pourtant c'est le contraire qui a lieu, car, en réalité, le poids de sable proprement dit contenu dans un mètre cube de sable brut est inférieur au poids du mètre cube de sable sans cailloux, et donne avec le liant un mortier plus riche, au milieu duquel les cailloux introduits avec le sable se trouvent disséminés, sans guère l'affaiblir.

L'expérience rapportée dans le tableau suivant en donne un exemple :

Composition du sable brut en poids	Sable	100	100	100	100
	Petits cailloux	0	10	20	30
Poids du mètre cube du mélange sableux[1] .... kg.		1.742	1.778	1.821	1.842
	Poids de ciment par m³ de sable brut :				
Compacité.	Mortiers à 300 kg..	0,675	0,687	0,703	0,710
	Mortiers à 400 kg..	0,675	0,692	0,701	0,716
	Mortiers à 500 kg..	0,683	0,698	0,703	0,732
Résistance à la compression par cm² après 1 an d'immersion à l'eau douce.	Mortiers à 300 kg..	81	87	108	124
	Mortiers à 400 kg..	119	128	145	159
	Mortiers à 500 kg..	149	175	190	225

A fortiori les mortiers de sable brut doivent-ils être supérieurs à des mortiers de sable tamisé de même dosage pondéral.

Il y a donc avantage à employer les sables avec les petits cailloux ou gros graviers qu'ils peuvent contenir.

Mais de trop gros grains peuvent être gênants dans un grand nombre d'applications, et le choix de la grosseur limite doit être subordonné à la nature du travail à exécuter.

[1] Sable sec versé à la pelle, sans tassement, dans une boîte carrée de 50 litres d'une profondeur de 0m,20.

On trouvera divers exemples numériques de la supériorité des mortiers de sable brut dans une note que nous avons publiée récemment [1], et où se trouve développée une application pratique de la méthode qui va être décrite à l'article 105.

105. Choix du sable et du dosage. — Une méthode recommandée fréquemment [2] pour déterminer la proportion minimum de liant qu'il convient de mélanger à un sable donné quelconque pour obtenir un mortier compact, consiste à mesurer expérimentalement le vide du sable et le rendement du liant en pâte pure et à en déduire le poids de liant capable de fournir un volume de pâte égal à celui des vides du sable, après déduction du volume d'eau nécessaire pour mouiller les grains de ce dernier.

Les variations énormes du volume des vides d'un même sable suivant la manière dont on le mesure (art. 93) permettent de croire qu'*a fortiori* l'écartement de ses grains, quand il est gâché à l'état de mortier avec un liant, doit différer de celui qui résulte des essais faits sur le sable pur, et, par suite, font douter de l'exactitude de cette méthode.

Du reste, appliquons-la au sable P et au ciment ayant servi pour les mortiers de la figure 75 :

Le sable P, mesuré sec et sans tassement, pèse, par litre, $1^{kg},575$;

son poids spécifique étant 2,65, le volume plein réel est $\frac{1,575}{2,65} = 0,594$,

et celui du vide est $1 - 0,594$, soit 0,406.

Le sable P exige, pour être mouillé, environ 16 pour 100 de son poids d'eau, soit par litre $0,16 \times 1,575$ ou $0^{L},252$.

Le volume à remplir de pâte est donc $0,406 - 0,252$ ou $0^{L},154$.

Le ciment employé exige 24,7 pour 100 de son poids d'eau pour être amené en pâte liée ;

[1] *Annales des Ponts et Chaussées*, 1896, II, p. 174.

[2] Cugnin : *Nouvelles Annales de la Construction*, 1881.
De Préaudeau : *Annales des Ponts et Chaussées*, 1881, II, p. 393.
Candlot : *Nouvelles Annales de la Construction*, 1889.

Cette pâte contient par litre $1^{kg},688$ de ciment sec.

Pour en obtenir $0^{L},154$, la méthode conduit donc à prendre $0,154 \times 1,688$, soit $0^{kg},260$ de ciment et $0,260 \times 0,247$, soit 0,064 d'eau, de sorte qu'en somme le mortier devra être dosé à raison de 260 kilogrammes de ciment et 252 + 64 ou 316 litres d'eau par mètre cube de sable.

Ces nombres, ramenés à un poids 1 de mélange sec, correspondent à une composition pondérale de 0,14 de ciment, 0,86 de sable et 0,17 d'eau. En se reportant à la figure 75 (traits pleins), on constate que ce mortier ne jouit d'aucune propriété particulière, attendu que c'est seulement à partir d'une proportion de ciment d'environ 0,45 que les courbes des valeurs de $c + s$ et de $c + s + e$ changent d'allure.

Il est préférable de déterminer *a posteriori* la composition volumétrique élémentaire de mortiers à dosages échelonnés et de traduire les résultats obtenus en diagrammes analogues à ceux des figures 75 et 76, qui mettent nettement en évidence les dosages correspondant à la compacité maximum ou au minimum des vides.

Toutefois, la considération des dosages n'a qu'un intérêt médiat : ce qu'il importe avant tout de comparer, c'est, d'une part, le prix de revient des mortiers et, d'autre part, leurs propriétés essentielles.

Dès lors, la meilleure méthode à suivre, surtout quand on a à choisir entre plusieurs sables, consiste à étudier expérimentalement comme il vient d'être dit des mortiers à dosages échelonnés faits avec chaque sable et le liant adopté, et à calculer les prix du mètre cube de ces divers mortiers.

Pour pouvoir comparer tous les résultats d'un seul coup d'œil, il suffit de construire un diagramme en prenant pour abscisses les prix de revient, et pour ordonnées les compacités et les résistances après une même conservation[1],

[1] A défaut d'essais de résistance, pour lesquels les chantiers ne sont pas toujours bien organisés et dont on est obligé d'attendre assez longtemps les résultats, on peut avoir immédiatement des indications très suffisantes en portant en ordonnées les valeurs du rapport $\frac{c}{e + v}$, ou mieux de l'expression

les points correspondant aux divers sables étant joints par des lignes continues de couleurs différentes. On base alors

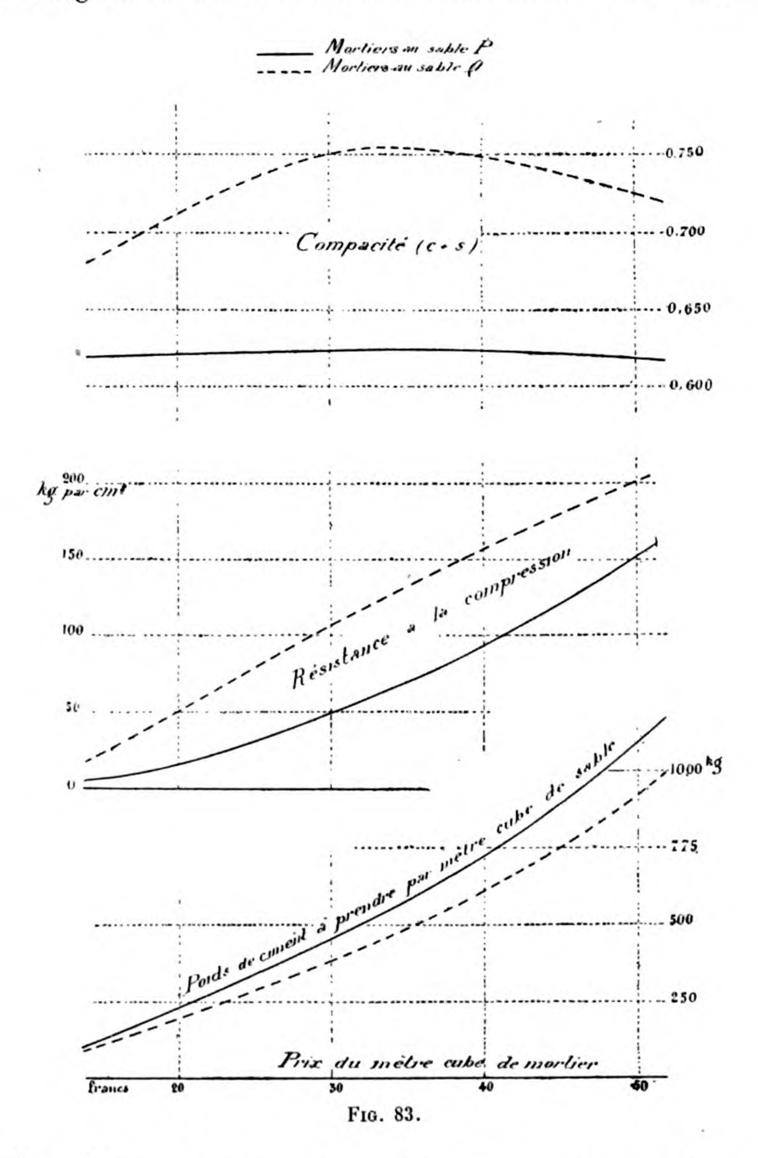


Fig. 83.

$\left(\frac{c}{1-s}\right)^2$, qui sont sensiblement proportionnelles aux résistances à la compression après une même durée (art. 87).

son choix sur les crédits dont on dispose et sur les importances relatives qu'on attache aux diverses qualités dont le mortier aura spécialement à faire preuve dans l'ouvrage projeté. Enfin d'autres lignes peuvent indiquer les poids de liant par mètre cube de sable, tel qu'on le mesure sur le chantier, correspondant aux prix portés en abscisses.

La figure 83, ainsi construite au moyen des données ayant servi pour les figures 75 et 76, permet de comparer les mortiers les plus usuels qu'on peut faire avec un même ciment et les sables P et Q. Pour le calcul des dosages, on a admis que, suivant qu'on opérait avec le premier ou avec le second de ces sables, un mètre cube contenait, sur le chantier, 1.535 kilogrammes ou 1.668 kilogrammes de sable sec [1]. On constate immédiatement l'énorme supériorité, à dépense égale, des mortiers de sable Q sur ceux de sable P. Les différences ne seraient d'ailleurs que très légèrement affaiblies si, au lieu des prix égaux admis pour ces deux sables, on en supposait un beaucoup plus fort pour le sable Q et un beaucoup plus faible pour le sable P.

§ 3. — Mortiers a trois éléments solides

106. Recherche du mortier le plus compact. — On a vu à l'article 102 que les mortiers plastiques les plus compacts résultaient de la réunion de deux catégories de grains de grosseurs aussi différentes que possible, de telle sorte que les plus gros fussent à peu près en proportion double des plus fins, liant compris.

L'une de ces catégories de grains devra nécessairement avoir la grosseur de ceux du liant et pourra être composée à la fois de liant et de sable fin.

Quant aux autres grains, plus ils seront volumineux, plus le mortier sera compact.

[1] En réalité, ces poids ont été déterminés de la manière indiquée au renvoi de la page 470.

Dès lors, aucun sable naturel n'étant constitué par la réunion de gros grains et de grains très fins sans contenir de grains intermédiaires (*loc. cit.*, *fig.* 12), les règles pratiques à observer seront les suivantes :

Faire choix du plus gros sable possible compatible avec la nature du travail à exécuter. Comme peu de sables naturels contiennent exclusivement des gros grains, éliminer par tamisage les grains les plus petits du sable choisi, de manière à augmenter sa différence de grosseur avec les grains fins.

D'autre part, prendre du sable fin ou quelque autre matière en poudre, comme on le verra dans la suite de ce paragraphe.

Si d, d' et δ représentent les poids spécifiques du gros sable, de la matière fine et du liant, les poids p, p' et π de ces trois éléments entrant dans l'unité de volume du mortier de compacité maximum seront liés par la relation :

$$(1) \qquad \frac{p}{d} = 2\left(\frac{p'}{d'} + \frac{\pi}{\delta}\right).$$

Le rapport des volumes réels de la matière fine et du liant pourra d'ailleurs être quelconque, sans que la compacité du mortier se trouve pour cela sensiblement modifiée (art. 101). En un mot, la valeur de la somme $c + s$ ne dépendra guère que du choix du gros sable.

Soit donc, pour le gros sable choisi, V la valeur de cette somme, qu'il sera facile de déterminer par une expérience spéciale. On aura entre p, p' et π la nouvelle relation :

$$(2) \qquad \frac{p}{d} + \frac{p'}{d'} + \frac{\pi}{\delta} = V.$$

Enfin, la somme $c + s$ restant constante, si la matière fine ajoutée est inerte, le rapport $\frac{c}{e + v}$ ou $\frac{c}{1 - V}$, et par suite la résistance du mortier, augmentera en même temps que la fraction du mélange fin constituée par le liant, de sorte que le meilleur mortier sera celui où le liant formera à lui seul

tous les grains fins. En pratique, un pareil mortier sera généralement trop riche et trop coûteux; on pourra alors se proposer de déterminer la proportion de liant de manière que le rapport $\frac{c}{e + v}$ ait une valeur donnée A, correspondant à la résistance finale désirée pour l'ouvrage particulier qu'on a en vue.

On aura donc :

$$A = \frac{\left(\frac{\pi}{\delta}\right)}{1 - V} \tag{3}$$

et les trois équations (1), (2) et (3) définiront les poids p, p' et π des matières à mélanger [1].

Si la matière fine peut faire prise par elle-même ou encore former avec le liant une combinaison capable de modifier l'énergie de ce dernier, la formule (3) est plus complexe ou même impossible à établir dans l'état actuel de nos connaissances ; nous reviendrons sur ce cas un peu plus loin.

Au lieu de fixer la troisième relation entre les poids inconnus par une condition de résistance, on pourra encore se donner *a priori* le prix du mortier.

Si les prix de la tonne des trois éléments sont respectivement f, f' et φ, pour que le prix total des matières entrant dans un mètre cube de mortier soit F, on devra avoir :

$$pf + p'f' + \pi\varphi = F, \tag{4}$$

équation qui, jointe aux équations (1) et (2), permettra de calculer p, p' et π.

[1] On en tire :

$$\frac{p}{d} = \frac{2}{3}V, \qquad \frac{p'}{d'} = \frac{V}{3} - A(1 - V) \qquad \text{et} \qquad \frac{\pi}{\delta} = A(1 - V)$$

Au lieu de se donner $\frac{c}{e + v} = A$, on peut se donner $\left(\frac{c}{1 - s}\right)^2 = B$; A et B sont alors liés par la relation :

$$B = \left(\frac{A}{1 + A}\right)^2, \qquad \text{ou} \qquad A = \frac{\sqrt{B}}{1 - \sqrt{B}}.$$

107. Addition de matières pulvérulentes. — Il résulte de ce qui précède que, lorsqu'on dispose d'un sable grenu ne contenant pas de grains inférieurs à une dimension déterminée, il est avantageux, au point de vue de la compacité du mortier, d'ajouter au liant une matière fine qui le divise et concoure avec lui à remplir les intervalles restant entre les grains du sable. Notamment, le mortier ainsi composé est plus compact que celui qu'on obtiendrait en mélangeant le liant avec un sable naturel contenant déjà des grains fins.

L'expérience rapportée par le tableau ci-dessous, dans laquelle un mortier battu de ciment et de sable normal a été additionné de proportions croissantes de sable fin, montre que les résistances ont néanmoins augmenté, par suite de l'augmentation de compacité.

Numéro du mortier.......	N° 1	N° 2	N° 3
Poids de ciment (passé au tamis de 4.900 m. par cm²).....	1	1	1
Poids de sable siliceux fin (passé au tamis de 4.900 m)....	0	0,5	1
Poids de sable quartzeux normal (64 — 144)	3	3	3
Eau de gâchage (en fonction du poids total de matières sèches).. p. 100	11,5	11,5	11,5
Résistance à la traction après 7 jours.........kg par cm².	22,3	23,7	25,0

En pratique, il y aurait souvent intérêt à employer pour la fabrication des mortiers des mélanges artificiels de deux sables, l'un gros et l'autre fin. Nous en avons donné un exemple dans la note citée à la fin de l'article 104.

Quand le sable grenu contient déjà des éléments fins, la figure 81 indique qu'il est souvent nuisible d'en ajouter de nouveaux en plus du liant. Pourtant, si le liant et la matière fine sont à un degré de finesse tel que leurs plus gros grains soient notablement plus fins que les plus petits grains du sable, on constate de nouveau un maximum de compacité pour un certain dosage, variable d'ailleurs, ainsi que la valeur de ce maximum, suivant la composition granulométrique du sable proprement dit.

Quels que soient le liant, la matière fine et le sable grenu que l'on choisisse, il est commode d'étudier graphiquement les variations des différentes qualités de tous les mortiers que l'on peut obtenir en faisant varier les proportions de ces trois éléments. Il suffit d'appliquer la méthode déjà exposée à l'article 92, en représentant chaque mélange par un point d'un triangle dont les trois sommets C, M, S, correspondent respectivement au liant, à la matière fine et au sable grenu, de telle sorte que ce point soit le centre de gravité du système obtenu en chargeant les trois sommets de poids proportionnels aux poids des trois éléments correspondants entrant dans le mélange.

On constate aussi notamment que, tant que le liant et la matière sont à peu près de même finesse et exigent pour le gâchage des proportions d'eau peu différentes, le diagramme donnant la compacité de chaque mortier plastique (qui maintenant est mesurée par la somme $c+m+s$, m désignant le volume absolu de matière fine entrant dans l'unité de volume du mortier frais) présente une ligne de crête à peu près parallèle au côté CM et plus ou moins rapprochée du sommet S suivant la composition granulométrique du sable grenu (voir plus loin les figures 84 et 93).

Si le liant et la matière ont été moulus ensemble avant d'être mélangés au sable grenu, la proportion d'eau nécessaire au gâchage et la compacité du mortier sont à peu près indépendantes des proportions relatives des deux éléments fins, et la surface topographique des compacités a pour lignes de niveau des droites parallèles au côté CM.

En général, l'addition de matières fines en proportion convenable augmente la résistance des mortiers. Ce résultat tient évidemment en grande partie à l'accroissement de compacité ; pourtant, il se peut que certaines matières aient une énergie propre ou augmentent celle du liant.

Les relations indiquées à l'article 87 permettent de reconnaître dans quels cas il en est ainsi :

Supposons qu'on ait fait divers mortiers avec des proportions variées d'un même liant, d'une même matière fine et

d'un ou plusieurs sables inertes, et qu'on ait déterminé leurs résistances à la compression P après une durée suffisante pour que le liant puisse être considéré comme ne contenant plus de grains non attaqués. Pour tous les mortiers sans matière additionnelle, les points ayant pour coordonnées $\frac{c}{e+v}$ et P seront sur une même courbe; de même, si la matière ajoutée est assimilable à du sable inerte, les points correspondant aux mortiers où elle entre seront sur la même courbe que les premiers [1]; mais, si la matière forme avec le liant un composé plus énergique, le volume c qui figure au numérateur du quotient $\frac{c}{e+v}$ dans la formule qui donne P devra être remplacé par une certaine fonction de c et de m, fonction plus grande que c, de sorte que les points ayant pour coordonnées $\frac{c}{e+v}$ et P se trouveront au-dessus de la courbe dont il vient d'être question.

Adoptons, par exemple, la formule générale : $P = K\left(\frac{c}{1-s}\right)^2$, et supposons que la matière ait une énergie propre, en d'autres termes soit un autre liant, et ne contienne plus de grains inattaqués lors des essais de rupture. Tous les mortiers dans lesquels les proportions relatives des deux liants seront les mêmes $\left(\frac{c}{c+m} = C^{te} = z\right)$ pourront être considérés comme résultant de divers mélanges du sable avec un nouveau liant, mélange des deux premiers dans la proportion considérée, occupant un volume réel $c + m$, et dont l'énergie sera mesurée par un certain coefficient K_z. On aura donc pour tous ces mortiers : $P = K_z\left(\frac{c+m}{1-s}\right)^2$. On pourra d'ailleurs calculer l'énergie K_z de chaque mélange par le quotient $\frac{P}{\left(\frac{c+m}{1-s}\right)^2}$ et représenter sa variation en fonction de z

[1] Dans ce cas, la formule générale $P = K\left(\frac{c}{1-s}\right)^2$ deviendra :

$$P = K\left[\frac{c}{1-(s+m)}\right]^2.$$

sur un diagramme ayant pour abscisses les valeurs de z (variables de 0 à 1) et pour ordonnées les valeurs de K_z correspondantes (voir *fig.* 87).

Si la matière ajoutée est une pouzzolane incapable de durcir seule, mais formant avec le liant une combinaison qui en augmente l'énergie, le problème sera plus complexe, car, outre que l'énergie de chaque mélange variera encore suivant les proportions relatives du liant et de la pouzzolane, une proportion variable de celle-ci restera inerte et devra être comptée avec le sable au dénominateur.

Dans ce cas, il sera nécessaire de faire porter les expériences sur un nombre de mortiers suffisant pour qu'à chaque valeur de z correspondent plusieurs mortiers différents, pour lesquels on déterminera, comme il a été expliqué à la page 430, le coefficient K_z et la proportion a_z de matière réellement active. Le diagramme présentera alors deux courbes indiquant comment varient ces deux nombres quand z croît de 0 à 1.

108. Mortiers bâtards. — M. R. Dyckerhoff a montré[1] qu'une légère addition de chaux grasse améliorait d'une manière notable les résistances des mortiers maigres de ciment portland et leur donnait une onctuosité favorable à leur bon emploi. En particulier, il a recommandé le mélange contenant, en poids, 1 partie de ciment, 7 parties de sable et 1/2 partie de chaux grasse en pâte.

En outre, il a trouvé que l'addition de chaux était, au contraire, nuisible aux mortiers riches.

Il est évident que la chaux agit là comme matière fine, à la manière du sable fin ajouté dans l'expérience citée à l'article précédent. Des expériences plus complètes, dans lesquelles nous avons fait varier méthodiquement les proportions d'un ciment (C), d'une chaux grasse éteinte en poudre (M) et d'un sable de Saint-Malo représenté par le point A de la figure 71 (S), nous ont d'ailleurs confirmé les observations qui précèdent.

[1] *Deutsche Bauzeitung*, 1879, n° 39; 1881, n°s 45 et 47.

La figure 84, qui peut servir de type pour tous les mortiers faits avec le même sable et des matières fines quelconques, représente les compacités $(c + m + s)$ des mortiers plastiques résultant de tous les mélanges possibles des trois matières. On voit que la surface topographique présente une ligne de crête XBX′ passant dans la région des mortiers ordinaires de la pratique et à laquelle correspondent des valeurs de la compacité comprises entre 0,672 et 0,680 environ. Si, à un mortier A de ciment et de sable (sur la figure, le pont A correspond au mortier contenant en poids 1 de ciment pour 4 de sable), on ajoute des proportions croissantes de chaux, le point représentatif du mélange se déplace de A vers M sur la droite AM ; la compacité augmente jusqu'au point B, puis décroît quand la proportion de chaux dépasse celle qui correspond à ce point.

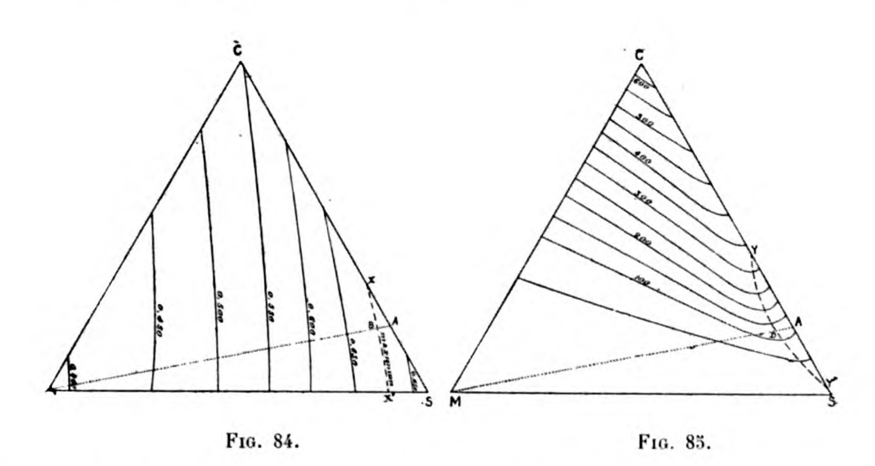


Fig. 84. Fig. 85.

La figure 85 représente de même les résistances à la compression par centimètre carré atteintes par les mêmes mortiers après conservation d'un an dans l'eau douce. Si l'on trace la courbe YDY′, lieu géométrique des points de contact des tangentes menées du point M aux projections des courbes de niveau de la surface topographique, le point D représentera le mortier de résistance maximum résultant de l'addition de chaux au mortier A, et le rapport du poids corres-

pondant de chaux au poids du mélange sec A sera mesuré par $\frac{DA}{DM}$.

Nous avons d'ailleurs constaté que les résistances étaient très sensiblement proportionnelles à l'expression $\left[\frac{c}{1-(s+m)}\right]^2$, ce qui indique que la chaux a joué le rôle d'un sable inerte.

Un autre emploi des mortiers de chaux et ciment mélangés, ou *mortiers bâtards*, consiste à ajouter un peu de ciment aux mortiers de chaux afin d'en augmenter l'hydraulicité et la résistance.

De même on peut, par économie, combiner en diverses proportions un ciment et une chaux plus ou moins hydraulique. Cette pratique n'a d'autre inconvénient que la difficulté d'obtenir un mélange parfait des deux poudres, de sorte que le mortier risque de manquer d'homogénéité et de présenter des points faibles.

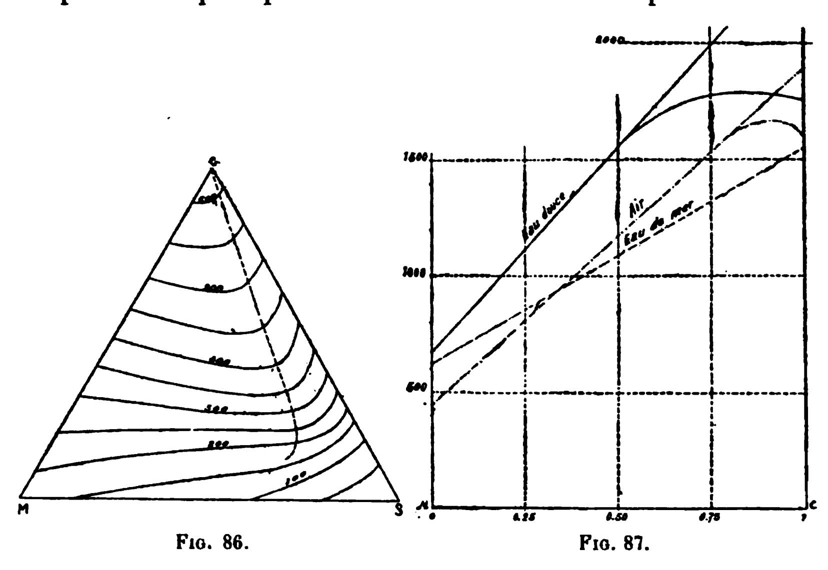


Fig. 86. Fig. 87.

La figure 86 indique les résistances à la compression par centimètre carré atteintes, après un an d'immersion à l'eau douce, par des mélanges du même ciment et du même

sable que ci-dessus avec une chaux hydraulique représentée par le sommet M[1].

En calculant les valeurs de K_z, quotients de ces résistances par l'expression $\left(\frac{c+m}{1-s}\right)^2$, et portant ces nombres en ordonnées pour des abscisses égales à $\frac{c}{c+m}$, on obtient, pour les mortiers conservés un an à l'eau douce, à l'eau de mer et à l'air, les trois lignes de la figure 87. Sauf les points représentatifs des mortiers de ciment seul conservés à l'eau douce et à l'air, tous les points correspondant à un même milieu de conservation sont en ligne droite. Il semble donc, abstraction faite de ces deux exceptions, que l'énergie des divers mélanges de chaux et de ciment croisse proportionnellement à leur teneur en ciment, ce qui indiquerait que les deux liants durcissent chacun pour son compte sans réagir l'un sur l'autre. Dans ce cas, en désignant par K_0 et K_1 les coefficients d'énergie des mortiers de chaux seule et de ciment seul après une même conservation, on aurait :

$$K_z = K_0 + z(K_1 - K_0) = \frac{K_1 c + K_0 m}{c+m},$$

et la formule générale donnant la résistance des mortiers bâtards après une même durée serait :

$$P = K_z \left(\frac{c+m}{1-s}\right)^2 = \frac{(K_1 c + K_0 m)(c+m)}{(1-s)^2}.$$ [2]

En dehors des mortiers bâtards de ciment et chaux, dont l'usage est d'ailleurs assez restreint, on ne compose, sur les chantiers, aucun autre mélange de divers liants. On pourrait pourtant, pour accélérer la prise des ciments lents sans guère affaiblir leur résistance finale, ajouter à ceux-ci un

[1] Le diagramme des compacités est analogue à celui de la figure 84, sauf que, la chaux hydraulique exigeant moins d'eau de gâchage que la chaux grasse, la compacité au sommet M est de 0,470 au lieu de 0,390.

[2] Une formule plus simple, conduisant à des résistances très peu différentes, serait :

$$P = \left(\frac{c\sqrt{K_1} + m\sqrt{K_0}}{1-s}\right)^2.$$

peu de ciment rapide. Nous avons montré[1] que quelques centièmes seulement de ce produit pouvaient entraîner une accélération de prise considérable.

109. Mortiers de chaux et pouzzolanes. — En général, les mortiers de chaux et pouzzolanes ne sont pas formés exclusivement de ces deux éléments, mais contiennent, en outre, du sable ordinaire. Les dosages diffèrent d'ailleurs fortement d'un chantier à l'autre, et il n'existe aucune règle fixe qui définisse les meilleures proportions à adopter.

La représentation triangulaire permet de choisir avec discernement parmi tous les mortiers de consistance donnée qu'on peut obtenir avec trois matières particulières.

A priori, l'emploi de pouzzolanes grenues concurremment avec du sable, est illogique en ce que la plus grande partie des grains pouzzolaniques de dimensions appréciables, n'étant pas en contact intime avec la chaux, se trouve dépensée en pure perte.

On aperçoit d'ailleurs, comme conséquence de ce qui a été exposé aux articles 102 et 106, que les meilleurs mortiers de sable, chaux et pouzzolane doivent être ceux qui sont formés d'environ 2 parties d'un gros sable sans grains fins ni moyens et de 1 partie d'un mélange de chaux et de pouzzolane finement pulvérisée. Quant aux proportions relatives de ces deux matières, elles dépendent essentiellement de leurs natures. En général, on doit prendre d'autant moins de chaux que celle-ci est plus grasse et la pouzzolane plus énergique.

Le tableau ci-dessous, extrait d'une série d'expériences beaucoup plus complète, donne les résistances à la compression par centimètre carré atteintes, après immersion d'un an à l'eau douce, par des mortiers plastiques dosés à raison de 3 parties en poids de sable de Saint-Malo (point A de la figure 71) pour 1 partie de divers mélanges de trois chaux et de cinq pouzzolanes pulvérisées et passées au tamis de 4900 mailles.

[1] *Annales des Ponts et Chaussées*, 1890, I, p. 335.

		15	20	25	30	35	40	45
Composition des mortiers en poids	Chaux	15	20	25	30	35	40	45
	Pouzzolane passant au tamis de 4.900 maillles	85	80	75	70	65	60	55
	Sable de Saint-Malo	300	300	300	300	300	300	300
Chaux grasse	Brique	88	86	79	68	63	56	51
	Trass	63	84	100	100	100	91	86
	Laitier granulé [1] (A)	131	113	109	98	97	84	77
	Autre laitier granulé [1] (B)	222	172	156	131	125	107	96
	Autre laitier granulé [1] (C)	263	272	246	215	197	174	163
Chaux hydraulique	Brique	47	64	86	101	103	94	85
	Trass	27	41	48	56	68	85	96
	Laitier A	146	146	126	121	117	119	100
	Laitier B	189	218	207	200	189	173	156
	Laitier C	206	254	255	234	248	251	248
Autre chaux hydraulique	Brique	59	73	87	100	103	95	95
	Trass	35	41	44	51	57	68	72
	Laitier A	146	135	124	126	109	111	115
	Laitier B	197	194	199	181	168	151	132
	Laitier C	206	246	239	219	234	227	216

On remarque que les trois laitiers granulés ont montré, surtout le dernier, un pouvoir pouzzolanique bien plus énergique que les échantillons de brique et de trass essayés.

L'énergie des pouzzolanes est augmentée si, avant l'introduction du sable, on les broie finement avec la chaux, de manière à rendre le mélange parfaitement intime et homogène. C'est ce qu'on réalise dans la fabrication des ciments de laitier qui, ainsi qu'on l'a vu plus haut, ne sont autre chose que des mélanges tout préparés et finement moulus de chaux et d'une pouzzolane artificielle spéciale.

On peut appliquer à l'étude de la composition des ciments de laitier les modes de représentation graphique et les calculs exposés à l'article 107.

Les figures 88 et 89 représentent ainsi les variations de résistance à la compression après un an d'immersion à l'eau douce de deux séries de mortiers plastiques faits avec un même sable (sable de Saint-Malo) représenté par les sommets S des triangles, un même laitier granulé finement

[1] Laitiers granulés servant à la fabrication du ciment de laitier dans trois usines différentes.

moulu (laitier C représenté par les sommets M, et deux chaux, l'une grasse (*fig.* 88), l'autre hydraulique (*fig.* 89), représentées par les sommets C. Aucun de ces mortiers, même avec la chaux grasse, n'offrait, lors des ruptures, de trace de décomposition[1].

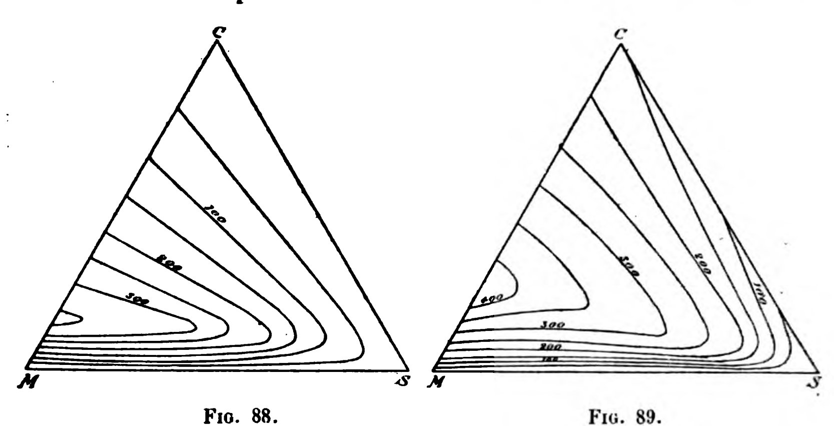


Fig. 88. Fig. 89.

Des mortiers identiques avaient été immergés à l'eau de mer. Aucun de ceux à la chaux hydraulique ne s'est altéré pendant la période d'un an après laquelle on a procédé aux ruptures. Quant aux mortiers de chaux grasse, quelques-uns seulement sont restés en bon état. Les autres se sont plus ou moins fissurés, sans perdre néanmoins toute leur résistance. La figure 90 indique quel était leur état après un an d'immersion.

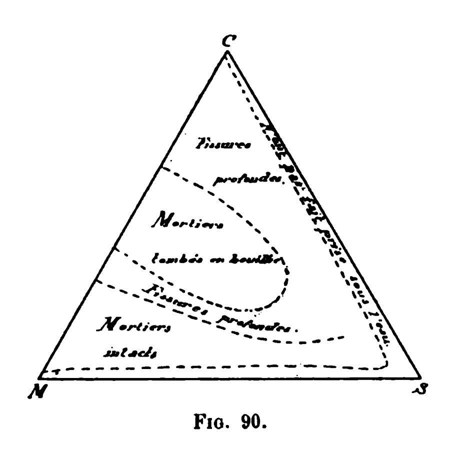


Fig. 90.

Les figures 91 (chaux grasse) et 92 (chaux hydraulique),

[1] Dans ces essais, la chaux et le laitier en poudre ont été simplement mélangés à la spatule et non broyés ensemble. L'immersion a eu lieu 2 semaines après le gâchage.

établies d'après le même principe que la figure 87 en assimilant les divers mélanges de chaux et de laitier à des produits hydrauliques ne contenant plus de particules inertes après un an[1], donnent les valeurs du coefficient K_z pour ces différents mélanges dans les trois milieux, en fonction de la proportion $z = \frac{c}{c+m}$ de chaux contenue dans un volume absolu 1 de chaque ciment de laitier. Il est évident que les valeurs de K_z doivent partir de 0 pour $z = 0$, c'est-à-dire pour le laitier pur, et retomber finalement à 0 pour les mortiers de chaux grasse sans laitier ($z = 1$) immergés. Les courbes trouvées doivent d'ailleurs être les mêmes, quel que soit le sable employé pour les essais.

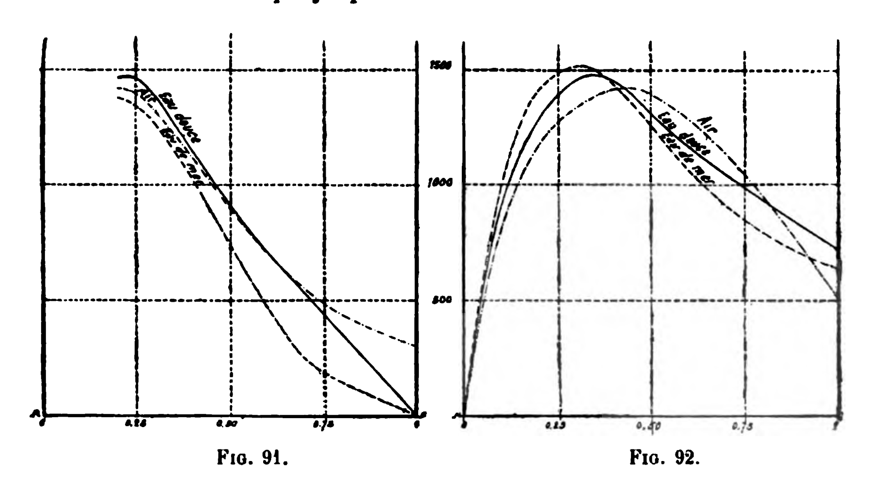


Fig. 91. Fig. 92.

110. Ciment amaigri. — Inventé depuis quelques années seulement, le *ciment amaigri* (*sand-cement*, *silico-portland*, etc.) est obtenu par le broyage intime d'un mélange de ciment portland et de sable, à un degré de finesse correspondant à environ 10 pour 100 de résidu sur la toile métallique de 4.900 mailles.

[1] Soit que les essais ne soient pas assez précis, soit que la formule $P = K \left\{ \frac{ac}{1 - [s + (1 - a) c]} \right\}^2$ (voir p. 430) ne soit pas assez approchée, les chiffres déduits des expériences ne permettent pas de calculer d'une manière suffisamment certaine la proportion a de matière réellement active.

Son emploi a pour but de fournir économiquement des mortiers de résistance modérée ou faible, qui soient encore compacts et plastiques, et où le ciment proprement dit se trouve également réparti.

Certaines usines mélangent même ce produit à du sable grenu de manière à livrer un mortier sec tout préparé, qu'il ne reste plus qu'à gâcher avant l'emploi. Ce procédé, bon au point de vue de l'homogénéité des mortiers, n'est évidemment économique qu'à la condition que l'usine où se font les mélanges soit à proximité du chantier.

En outre, que le ciment amaigri soit fourni seul ou associé avec du sable grenu, il est très difficile au consommateur d'en contrôler la composition. *A fortiori* ce produit ne doit-il pas être vendu frauduleusement sous le nom de ciment portland.

Ces réserves faites, le ciment amaigri fournit justement une solution de la question des mortiers de compacité maximum (art. 106), si l'on a soin de le mélanger avec un sable contenant le moins possible de grains fins. Mais, même avec les sables ordinaires de la pratique, il donne, en raison de sa grande finesse et malgré la plus forte proportion d'eau de gâchage qu'il exige, des mortiers dont la compacité n'est pas inférieure et peut être supérieure à celle des mortiers ordinaires de ciment portland. Le tableau ci-dessous en donne un exemple :

Sable	Provenance		Sable de dune	Saint-Malo	Gattemarre
	Composition granulométrique.	$g =$	0,00	0,17	0,73
		$m =$	0,01	0,69	0,25
		$f =$	0,99	0,14	0,02
	Point représentatif dans la figure 71		près de F	A	Q
Proportion de ciment correspondant au maximum de compacité (poids de ciment pur ou amaigri sur 1 de mélange sec)	Ciment portland		< 0,40	0,26	0,22
	Ciment amaigri		0,43	0,33	0,27
Compacité maximum	Ciment portland		0,605	0,707	0,758
	Ciment amaigri		0,660	0,714	0,750

L'état de division auquel le ciment proprement dit se trouve amené dans le ciment amaigri augmente la proportion de matière immédiatement active et, d'une manière générale, procure à ce produit les avantages et les inconvénients signalés plus haut (art. 36) pour les produits hydrauliques très finement moulus : augmentation de résistance, prise rapide et peut-être (?) tendance plus marquée à la décomposition par l'eau de mer.

Pour la même raison, les mortiers de ciment amaigri présentent une consistance liée et plastique comparable à celle des mortiers de chaux ou de ciment de laitier.

D'autre part, on peut se demander si, quand le sable broyé avec le ciment est siliceux, il n'acquiert pas, par suite de sa très grande finesse, la propriété de se combiner un peu avec la chaux du ciment [1]. Quoi qu'il en soit, il n'est pas impossible que le broyage simultané du sable et du ciment produise un rapprochement des molécules favorable au durcissement, et que les résistances des mortiers de ciment amaigri dépassent, malgré l'égalité des compacités, celles des mortiers de composition identique qu'on obtiendrait avec du ciment et du sable fin moulus séparément à la même finesse que les éléments du ciment amaigri.

En somme, le ciment amaigri, dont le principe répond si exactement au désidératum posé plus haut, paraît justifier assez bien, dans les essais de laboratoire que nous lui avons fait subir, les espérances qu'il inspire *a priori*.

Toutefois, pour que ce produit soit réellement économique, il importe que les frais entraînés par le supplément de mouture du ciment et du sable et par le transport à pied d'œuvre du sable broyé avec le ciment ne contre-balancent pas les avantages qui en résultent.

On s'en rendra compte dans chaque cas, en même temps qu'on déterminera la meilleure composition à donner au ciment amaigri et au mortier, en construisant d'une part

[1] On sait depuis longtemps que, réduite à un état d'extrême division, la silice naturelle devient attaquable par divers réactifs qui n'exercent sur elle aucune action tant qu'elle est en grains de dimensions appréciables. Voir notamment à ce sujet la *Docimasie* de Rivot, article : *Silicium*.

des diagrammes triangulaires CMS donnant les prix et les principales propriétés de tous les mortiers de ciment amaigri qu'on peut faire avec le meilleur sable grenu dont on dispose, et, d'autre part, des diagrammes à simple entrée, analogues à ceux des figures 75 et 76, donnant les mêmes indications pour les mortiers binaires formés par le même sable et du ciment ordinaire. La comparaison des prix et des qualités dans les deux cas permettra seule de faire un choix judicieux.

111. Addition de matières pouzzolaniques aux mortiers de ciment. — On a vu au chapitre IV que la prise et le durcissement des ciments résultaient du dédoublement de sels à plusieurs équivalents de chaux en sels moins basiques et en chaux libre. Cette chaux cristallise à l'état d'hydrate dans les pores du mortier et se trouve en partie dissoute, quand le mortier est immergé, en partie remplacée par de la magnésie, quand l'immersion a lieu en eau de mer, et en partie carbonatée progressivement, surtout dans les maçonneries aériennes.

D'autre part, les pouzzolanes ayant, par définition, la propriété de se combiner à la chaux en présence de l'eau pour former des composés capables d'acquérir une dureté plus ou moins grande, on peut se demander si l'addition de pouzzolanes aux mortiers de ciment n'aurait pas pour effet de fixer la chaux mise en liberté par la prise, dans de nouvelles combinaisons hydrauliques dont le développement simultané augmenterait la compacité et la cohésion du produit initial.

Cette thèse a été notamment soutenue depuis une quinzaine d'années à l'étranger par quelques spécialistes, tels que MM. Michaëlis[1], Tetmajer[2], Erdmenger[3], etc., qui ont cité diverses expériences à l'appui. Malheureusement ces expé-

[1] *Deutsche Töpfer und Ziegler Zeitung*, 1882, n° 33.
Offener Brief an den Deutschen Cement-Fabrikanten Verein, 1884.
Résistance des matériaux hydrauliques à la mer, Bruxelles, 1896.

[2] *Schweizerische Bauzeitung*, 1884, n° 24. *Töpfer und Ziegler Zeitung*, 1884, n°s 26 et 46.

[3] *Thonindustrie Zeitung*, 1896, n°s 32, 51, 53, 56.

riences, faites la plupart du temps sur des mortiers battus de sable normal uniforme, n'ont pas toujours été très probantes, et on a pu leur objecter que les augmentations de résistance constatées dans certains cas n'avaient d'autre cause que l'augmentation de compacité résultant de l'addition d'une matière fine. En particulier, l'Association des Fabricants de portland allemands s'est toujours montrée nettement opposée à cette théorie, dont la mise en pratique aurait pu, selon elle, ouvrir le champ à de nombreuses fraudes, compromettre la bonne renommée des usines et faire suspecter la pureté de leurs produits [1].

Du reste, les rares tentatives faites par certains fabricants en vue d'additionner leurs ciments de matières moins coûteuses prétendues pouzzolaniques n'ont obtenu aucun succès. Il convient toutefois d'ajouter qu'à part quelques préparations sur la nature desquelles les expérimentateurs précités ont gardé le secret, les matières employées le plus souvent, et notamment les laitiers non granulés (fusés ou moulus) étaient réellement inertes.

Par contre, il en est d'autres, telles que les pouzzolanes et certains laitiers granulés, qui sont hien connues pour former avec la chaux, au contact de l'eau, des combinaisons très résistantes, et doivent exercer une influence favorable sur le durcissement des ciments.

Nous avons cité plus haut (p. 336) une expérience d'où il ressort très nettement que l'addition de certaines matières, et même leur substitution à une partie du ciment, peuvent améliorer dans une large mesure la résistance du mortier, alors même que la compacité ne serait pas modifiée.

L'effet des matières pouzzolaniques ajoutées en poudre fine ne se manifeste pas seulement par des augmentations de résistance ; en raison de leur affinité pour la chaux, ces

[1] *Bericht über die Verhandlungen der VI. General-Versammlung des Vereins deutscher Zement-Fabrikanten, betreffend die Zumischung minderwerthiger Körper zum Porlantzement*, Berlin, 1883.

Réfutation du dernier mémoire du Dr Michaëlis : Verhandlungen des Vereins zur Beförderung des Gewerbfleisses, 1896, p. 182 (traduite en français dans le journal *Le Ciment*, n° du 25 novembre 1896).

matières neutralisent la chaux libre ou les sels fortement calcaires que les ciments peuvent contenir et qui constituent alors les *expansifs* dont les dangers ont été signalés plus haut. Nous avons constaté à plusieurs reprises que des ciments qui se fissuraient à l'état de pâtes pures ou de mortiers de sable inerte très fin se comportaient bien, au contraire, si l'on remplaçait ce sable fin par de la poudre de laitier granulé.

Les pouzzolanes naturelles semblent exercer une action moins prononcée.

Cette propriété précieuse des laitiers granulés de neutraliser l'effet des expansifs et d'augmenter les résistances, pourrait être mise à profit de la manière la plus heureuse, de telle sorte qu'il en résultât en même temps une augmentation de compacité et une économie. Il suffirait de broyer ces matières avec le ciment, en un mot de former des ciments amaigris où le sable fût remplacé par du laitier pouzzolanique. On combinerait ainsi les avantages résultant de l'état physique du ciment amaigri à ceux qui proviennent de l'action chimique des pouzzolanes.

Des expériences variées, actuellement en cours au laboratoire des Ponts et Chaussées de Boulogne-sur-Mer, confirment cette manière de voir. Nous citerons seulement les suivantes :

1° Des mortiers plastiques ont été faits avec divers mélanges d'un même ciment portland, d'une même poudre de laitier granulé servant à la fabrication du ciment de laitier (laitier B) et de sable de Saint-Malo, sans que le ciment et le laitier aient été préalablement moulus ensemble.

La figure 93 représente les compacités de ces mortiers et la figure 94 leurs résistances à la compression après quatre semaines de conservation à l'eau douce. En assimilant chaque mélange de ciment et de laitier à un produit spécial qui ne contiendrait pas de grains inattaqués à l'époque des ruptures [1], on trouve que le coefficient K_2, par lequel il convient de multiplier la valeur de l'expression $\left(\frac{c+m}{1-s}\right)^2$ relative à

[1] Voir le renvoi de la page 487.

chaque mortier pour obtenir la résistance correspondante, varie, quand la proportion de ciment contenue dans le mélange (ciment + laitier) croît de 0 à 1, comme l'indique

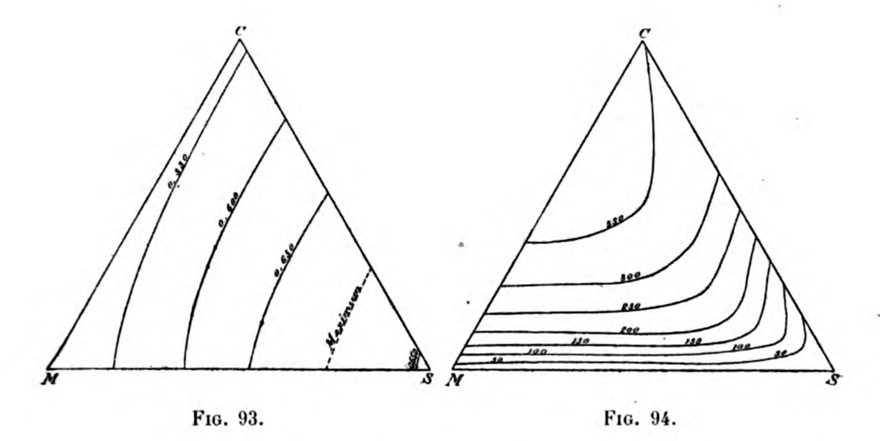


Fig. 93.

Fig. 94.

la courbe n° 1 de la figure 95. On remarque notamment qu'un mélange composé de parties égales de ciment et de laitier possède à peu près la même énergie que le ciment pur, énergie qui est même dépassée pour des mélanges intermédiaires et paraît atteindre son maximum quand le ciment est en proportion triple du laitier.

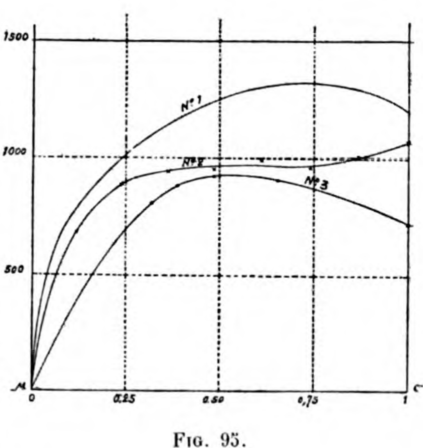


Fig. 95.

2° Un autre ciment portland et un autre laitier (laitier A) ont été mélangés en diverses proportions, et chaque mélange (ainsi qu'un lot de ciment pur) a été pulvérisé et homogénéisé pendant un même temps dans un broyeur à boulets. Avec chacune des poudres obtenues et différents sables, on a fait un certain nombre de mortiers, qui ont été essayés après 12 semaines

de conservation dans l'eau douce (d'autres éprouvettes identiques seront rompues après plusieurs années); les résistances trouvées ont permis de calculer la valeur de K_z correspondant à chaque mélange.

Le tableau suivant et la courbe n° 2 de la figure 95 indiquent les résultats obtenus.

Composition du mélange en poids	Ciment ($\delta = 3{,}10$).	1	2	3	4	5	6	7	8
	Laitier ($d = 2{,}90$).	7	6	5	4	3	2	1	0
	$z = \frac{c}{c+m} =$	0,118	0,237	0,360	0,483	0,609	0,737	0,868	1
	$K_z = \frac{P}{\left(\frac{c+m}{1-s}\right)^2} =$	680	890	940	950	985	955	1010	1070

Des mélanges contenant, en volumes absolus, deux parties de laitier pour une de ciment ($z = 0{,}333$) ont déjà presque la même énergie que le ciment pur.

3° On a broyé de la même manière, chacun pendant le même temps, divers mélanges d'un autre ciment (ciment portland de deuxième qualité), du même laitier A et d'un sable très fin contenant environ 80 pour 100 de son poids de silice et 20 pour 100 de carbonate de chaux. Les expériences, faites comme les précédentes, ont donné pour K_z, après douze semaines d'immersion à l'eau douce, les valeurs suivantes, calculées en admettant que chaque mélange du ciment et du laitier constitue une matière complètement active, tandis que le sable fin serait inerte :

Proportions en poids :	Ciment ($\delta = 3{,}10$)	2	2	2	2	2
	Laitier ($d = 2{,}90$)	4	3	2	1	0
	Sable fin.........	0	1	2	3	4
	$z = \frac{c}{c+m} =$	0,318	0,384	0,483	0,632	1
	$K_z = \frac{P}{\left[\frac{c+m}{1-(s+s)}\right]^2} =$	810	880	920	900	715

Ces nombres, auxquels correspond la courbe n° 3 de la figure 95, montrent qu'un mélange de trois parties de laitier pour une de ciment a eu à peu près la même énergie que le ciment pur, et qu'un mélange de parties égales des deux matières a eu une énergie d'environ 30 pour 100 supérieure.

4° On a immergé à l'eau de mer des mortiers plus ou moins maigres composés de divers mélanges de laitiers pouzzolaniques et de ciments, les uns de bonne qualité, les autres mal triés et contenant des expansifs. Bien que quelques-uns de ces mortiers ne contiennent que des proportions de ciment extrêmement faibles et que certains subissent depuis plus d'un an le contact de l'eau salée, aucune décomposition n'a encore été constatée.

Il ressort de ces diverses expériences qu'en général un mélange par parties égales de ciment et de laitier a une énergie au moins égale au ciment pur, en même temps qu'il présente une plus grande sécurité au point de vue des désagrégations.

On pourrait donc composer des mortiers de 2 parties de sable grenu sans grains fins et de 1 partie de ce mélange. Mais, dans bien des cas, un pareil mortier serait plus résistant qu'il n'est nécessaire ; on diminuerait alors encore la dépense en broyant dans le mélange de ciment et de laitier une certaine quantité de sable fin, comme on l'a fait dans la troisième expérience citée ci-dessus.

Ces mélanges, quels qu'ils soient, pourraient d'ailleurs être faits, soit dans des usines qui les vendraient tout préparés, soit, pour éviter toute fraude et quand l'importance des travaux justifierait une installation spéciale, par le consommateur lui-même, dans des broyeurs annexés aux grands chantiers de maçonnerie.

Les laitiers granulés provenant des hauts-fourneaux, qui jusqu'à présent nous ont donné les résultats les meilleurs, ne sont peut-être pas les pouzzolanes les plus énergiques qu'on puisse obtenir.

Pour chercher la composition la plus convenable, il conviendrait de préparer dans des conditions identiques (notam-

ment quant à la différence des températures du laitier fondu et de l'eau de trempe et quant aux masses relatives de ces deux matières) des laitiers formés exclusivement de proportions variées de silice, d'alumine et de chaux pures, qu'on représenterait par des points d'un triangle dont les sommets correspondraient à chacun de ces trois éléments.

En mesurant, par des expériences analogues à celles qui viennent d'être rapportées, les pouvoirs pouzzolaniques[1] de ces divers laitiers, on éliminerait rapidement une grande partie du triangle comme correspondant à des compositions inadmissibles, et on n'aurait plus qu'à resserrer progressivement les points d'essai dans la région utile, jusqu'à ce qu'on puisse y tracer la surface topographique des pouvoirs pouzzolaniques, surface dont le point culminant correspondrait à la composition cherchée.

§ 4. — Fabrication des mortiers

112. Mesurage des matières. — Après que des expériences de laboratoire, faites sur des quantités rigoureusement pesées des matériaux dont on dispose, ont indiqué le meilleur dosage à adopter, on doit transformer en volumes, mesurés comme sur le chantier, les poids trouvés pour les matières, telles que le sable, qu'il est plus commode, dans les conditions ordinaires des travaux, de cuber que de peser. Dans la pratique, le mesurage des divers éléments des mortiers s'effectue généralement comme il suit :

Chaux en pierres. — Quand elle est livrée en pierres, la chaux se mesure au volume. On lui fournit alors immédiatement la quantité d'eau nécessaire pour la transformer en pâte.

[1] Le pouvoir pouzzolanique d'un laitier pourrait, par exemple, être mesuré par la valeur maximum des coefficients d'énergie K_2 après une même conservation (par exemple 1 an dans l'eau douce) de mélanges en proportions variées de ce laitier et de chaux grasse pure parfaitement éteinte.

D'après Vicat, 1 mètre cube de chaux en pierres, ayant un poids moyen de 800 à 860 kilogrammes, peut absorber, suivant la nature de la chaux, depuis 1 jusqu'à 2,85m³ d'eau. Quant au volume de la pâte produite, il est supérieur à celui de la chaux vive en pierres. Le foisonnement, comme on appelle cette augmentation de volume, est d'ailleurs extrêmement variable : M. Durand-Claye cite comme maximum un foisonnement de 2 pour 1 pour les chaux grasses et de 1,3 à 1,5 pour 1 pour les chaux hydrauliques de bonne qualité.

Il faut donc, quand on veut établir un devis de travaux, commencer par déterminer : 1° le poids d'un volume donné de chaux vive ; 2° la quantité d'eau nécessaire pour amener en pâte un poids donné de cette chaux ; 3° le volume de pâte fourni ; on en déduit le volume d'eau nécessaire pour 1 mètre cube de pierres, le volume de pâte correspondant et le poids de chaux contenu dans un volume donné de pâte.

L'emploi de chaux en pierres se restreint de plus en plus.

Liants en poudre. — Vu la proportion relativement faible de liant mélangée au sable dans les mortiers de la pratique, il importe que le ciment ou la chaux en poudre soient dosés très exactement. Aussi le mesurage en volume, qui donne des résultats variables suivant la manière dont on opère, ne doit-il pas être recommandé pour ces matières. Il est d'ailleurs beaucoup plus pratique de les mesurer en poids, puisqu'elles sont fournies par le commerce en sacs ou en barils de poids connus.

La même observation s'appliquerait au cas où la poudre à ajouter au sable serait un mélange d'un liant et d'une matière fine quelconque, mélange qui devrait toujours être préparé d'avance avec le plus grand soin.

On admet généralement qu'un mètre cube de ciment portland pèse de 1.300 à 1.400 kilogrammes.

Sables. — Au contraire, il est généralement peu pratique de peser le sable, et on préfère le mesurer au volume. On emploie, à cet effet, soit des caisses carrées sans fond, jau-

geant une fraction simple de mètre cube, soit les brouettes mêmes servant à transporter le sable à l'endroit où le mortier doit être fabriqué. Dans ce cas, il est avantageux de donner aux brouettes une capacité telle que, pour obtenir un mortier au dosage adopté, il faille mélanger un nombre entier de sacs de liant à un nombre entier de brouettées de sable.

Mais, s'il est plus commode, le mesurage du sable au volume laisse à désirer comme exactitude, ainsi que nous l'avons montré plus haut (art. 93).

Le tableau ci-dessous, déduit de l'expérience représentée par la figure 72, montre notamment que les erreurs de dosage provenant de l'humidité variable du sable peuvent être considérables, et qu'il est dès lors nécessaire de modifier dans certains cas les proportions apparentes des matières à mélanger, de telle sorte que leurs proportions réelles restent les mêmes.

		DOSAGES qu'on obtiendrait en employant du sable humide au lieu de sable sec					POIDS DE LIANT à employer par mètre cube de sable humide pour obtenir les dosages proposés				
Poids d'eau mouillant 100 kg de sable sec	kg.	0.5	1	2	3	5 à 10	0,5	1	2	3	5 à 10
Perte de poids subie après séchage par 5 kg. de sable humide.	g.	25	49,5	98	145,5	238 à 454	25	49,5	98	145,5	238 à 454
Dosages à obtenir (poids de liant par mètre cube de sable sec)	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.
	200	224	238	245	249	254	179	168	163	161	158
	300	335	357	368	373	381	269	253	244	241	236
	400	446	486	490	497	508	359	336	326	321	315
	500	559	595	612	621	634	448	421	408	402	394
	600	670	714	735	745	761	538	505	489	482	473
	800	895	951	980	995	1.015	716	671	652	643	630
	1.000	1.119	1.190	1.226	1.242	1.270	895	840	816	804	788
	1.500	1 676	1.784	1.839	1.864	1.902	1.342	1.261	1.223	1.208	1.183
Volumes de sable humide à employer avec les poids de liant indiqués dans la première colonne pour obtenir les dosages proposés................m³.							1,118	1,190	1,226	1,242	1,268

On voit qu'en général, si l'on néglige de tenir compte des différences d'humidité du sable, les mortiers sont plus riches en hiver qu'en été, et qu'on doit se méfier de ceux qui sont fabriqués après une longue durée de sécheresse, comme devant être plus maigres que la moyenne.

Il convient donc, dans les travaux de longue haleine, de mesurer fréquemment l'humidité du sable en déterminant la perte subie après séchage par un poids donné de sable humide, et d'en déduire par le calcul soit le poids de liant à retrancher de celui qui correspondrait au sable sec, soit plutôt, pour que la quantité de mortier produite reste la même, le volume de sable humide à prendre en plus d'un mètre cube. Il serait d'ailleurs commode de faire les calculs à l'avance pour tous les degrés d'humidité possibles, et d'établir un barême indiquant les volumes additionnels de sable à prendre dans chaque cas. Suivant la perte trouvée après séchage, quelques boîtes jaugées de dimensions échelonnées permettraient de faire l'appoint à un nombre déterminé de brouettées de sable.

113. Mélange à sec et mouillage. — Le liant en poudre et le sable, débarrassé ou non par tamisage ou à la claie des cailloux et des plus gros grains suivant la destination du mortier, doivent être parfaitement mélangés à sec avant l'addition de l'eau. On reconnaît que ce résultat est atteint quand l'ensemble présente une couleur bien uniforme.

Si le sable est humide, le mélange est difficile à rendre bien homogène; il forme des pelotes où le liant ne s'introduit que difficilement. En outre, la masse doit être immédiatement transformée en mortier, car, contrairement à l'opinion de Rivot et Chatoney, qui recommandaient la « digestion préalable », opinion combattue d'ailleurs par Vicat, le liant ne tarderait pas à s'altérer au contact de l'humidité du sable, et perdrait une grande partie de son énergie. On doit donc faire en sorte de n'employer, autant que possible, que du sable bien sec.

Le mélange, ainsi du reste que le malaxage ultérieur du mortier, doit être fait à couvert, sur une aire bien propre ;

on doit éviter soigneusement d'y introduire des restes de mortier déjà ancien.

La quantité de matière à gâcher en une même reprise doit être réglée suivant l'activité du chantier et la vitesse de prise du liant.

L'eau de gâchage doit être propre et mesurée exactement, après déduction, s'il y a lieu, de celle qui se trouve introduite avec le sable quand celui-ci est déjà plus ou moins mouillé. En principe, il faut employer aussi peu d'eau que possible et obtenir la plasticité par un malaxage prolongé ; aussi doit-on réagir contre la tendance qu'ont les manœuvres à ajouter un excès d'eau, de manière à rendre le mortier moins dur à manier. Comme un jet trop vif pourrait séparer par grosseurs de grains les matières mélangées à sec et détruire l'homogénéité du mélange, l'eau doit être versée lentement et en pluie fine, par exemple au moyen d'une pomme d'arrosoir.

En pratique, la proportion d'eau employée varie suivant la rapidité de la prise et suivant la température.

114. Malaxage. — Selon l'importance du chantier et les moyens dont on dispose, le mortier peut être malaxé à bras ou par des procédés mécaniques.

Malaxage a bras. — Employé de préférence pour les travaux de courte durée ou dans les pays lointains où le transport d'un matériel spécial serait trop onéreux, ce mode de malaxage se pratique de manières un peu différentes suivant la nature du liant dont on fait usage.

Avec la chaux en pâte, qui doit être éteinte depuis au moins quelques jours et débarrassée des incuits et des fragments mal éteints, l'opération est la suivante [1] :

« On prépare sur le sol du chantier une aire en planches, pour éviter que la terre ne se mélange au mortier ; on répand sur cette plate-forme le nombre de brouettées de sable nécessaire pour une opération, et l'on étale ce sable à la

[1] D'après l'*Étude sur les mortiers* de M. Foy (*Nouvelles Annales de la Construction*, 1867).

pelle en forme de bassin circulaire; on verse à l'intérieur de ce bassin la quantité déterminée de chaux en pâte, et l'on procède au mélange intime du sable et de la chaux au moyen de rabots en bois ou en fer ; on manie cet instrument en le poussant sur le plat, afin de comprimer les matières sur le plancher et d'en broyer les mottes, puis en le ramenant à soi sur le tranchant, afin de soulever la matière et de pouvoir ramener un peu de sable du bassin sur la partie ramollie. Un manœuvre retrousse le tas avec une pelle, au fur et à mesure que d'autres l'étalent avec des rabots, et le mortier est fait lorsque toutes les matières sont bien mélangées, c'est-à-dire lorsqu'on n'aperçoit plus aucune particule de chaux séparée du sable; on relève une dernière fois le tas, dans lequel les manœuvres vont puiser le mortier pour le porter aux maçons. »

Avec les ciments à prise rapide, qui demandent à être employés sans retard, on ne peut opérer que sur de petites quantités de matière. Comme, en général, ces ciments sont employés en mortiers riches ou même en pâtes pures, ils n'acquièrent une bonne consistance plastique qu'à la suite d'une manipulation énergique ; aussi ne faudrait-il pas chercher à suppléer à cette manipulation en ajoutant une quantité d'eau trop forte, qui affaiblirait beaucoup le mortier.

Avec les liants à prise lente fournis en poudre, les matières, étalées sur une aire plane en tôle, sont d'abord mélangées à sec ; quand le mélange est parfaitement homogène, on creuse au centre une cuvette où l'on verse la quantité d'eau nécessaire, dans laquelle on fait tomber progressivement les matières qui forment les bords de la cuvette ; on mélange ensuite toute la masse et on continue le malaxage au moyen de rabots et de pelles, comme il a été expliqué pour le cas des mortiers de chaux en pâte.

Malaxage mécanique. — Sur les grands chantiers, il est avantageux, au double point de vue de l'économie et de la qualité des mortiers, de fabriquer ces derniers mécaniquement.

Les appareils employés, quoique présentant une grande

variété, peuvent être divisés en deux groupes, suivant qu'ils servent seulement à mélanger les matières ou qu'ils les broient en même temps.

Dans la première catégorie doivent être classés le râteau de Peyronnet, mû par un cheval dans une cuve circulaire, ainsi que divers appareils plus récents, appelés tonneaux de corroyage, turbines, malaxeurs, etc., formés en général d'un réservoir cylindrique vertical fixe, où les matières, introduites par la partie supérieure, sont brassées par des herses ou des hélices étagées sur un arbre central commandé par un engrenage. Dans d'autres appareils, le tambour est presque horizontal et les matières, introduites par une extrémité à l'état sec, se trouvent d'abord mélangées, puis humectées et triturées, tout en avançant vers l'autre extrémité, où on recueille le mortier. L'entraînement est produit soit par la rotation du tambour autour de son axe, soit, au contraire, par le mouvement d'une hélice dans le tambour immobile.

Les broyeurs à mortier se composent essentiellement d'une auge annulaire dans laquelle les matières sont écrasées par une ou plusieurs meules tournant autour de leur axe horizontal, tandis que des râcloirs en forme de socs de charrue relèvent le mortier, le retournent et le ramènent sous les meules. Tantôt la cuve est fixe et les meules mobiles, tantôt c'est le contraire. Dans les deux cas, un certain jeu est laissé aux meules pour qu'elles puissent se soulever au passage des morceaux trop durs.

Pour la comparaison entre les deux systèmes, nous ne saurions mieux faire que de citer un extrait de l'ouvrage de M. A. Mahiels, où l'on trouvera un grand nombre de renseignements pratiques sur les avantages relatifs, le rendement et l'économie des principaux appareils à mortier [1].

« On affirme que les broyeurs donnent les meilleurs mortiers. L'assertion est exacte pour les mortiers de chaux et de pouzzolane ; mais elle ne peut s'appliquer aux mortiers de ciment, surtout à ceux qui sont destinés à la confection des bétons.

[1] *Le Béton et son emploi*, p. 69, Liège, 1893.

Le ciment est déjà réduit en poudre fine ; toute trituration supplémentaire est donc superflue. De plus, la grosseur des grains de sable exaltant la résistance du mortier, l'écrasement de ces grains deviendrait un contre-sens.

Les mélangeurs ou malaxeurs, comparés aux broyeurs, présentent les avantages suivants :

Ils coûtent beaucoup moins.

L'installation en est simple et rapide ; leur poids est faible.

Ils absorbent peu de puissance.

Ils sont de rendement supérieur comme importance de production.

. . . .

On invoque en revanche, en faveur des broyeurs, le poids des meules ; celui-ci fait ressuer l'eau et chasse l'air contenu dans le mortier ; ces actions augmentent la compacité du mélange..... »

La meilleure solution serait sans doute d'employer des meules juste assez lourdes pour assurer une bonne trituration du mortier, sans toutefois écraser les grains du sable. On a en effet constaté qu'un long corroyage rendait le mortier plus plastique, plus lié et plus résistant.

115. Mise en œuvre. — On a vu en divers points du chapitre IV, et plus particulièrement à l'article 48, comment les propriétés des mortiers pouvaient se trouver modifiées suivant les conditions d'emploi. Nous ne ferons que résumer ici sans nouveaux commentaires les conclusions qui se dégagent de ces observations, et dont la plupart constituent des préceptes classiques formulés déjà depuis longtemps.

Les principales règles à observer sont les suivantes :

Employer le mortier avant qu'il ait manifesté aucun commencement de prise.

Si la prise se produit pendant le gâchage, rejeter franchement le mortier et ne pas chercher à le ramollir par un gâchage plus prolongé avec ou sans addition de nouvelle eau.

De même, éviter de rebattre, avec ou sans nouvelle eau, des restes de mortiers fabriqués antérieurement et déjà plus ou moins durcis.

Bien nettoyer et mettre à vif les surfaces à enduire, et les mouiller abondamment, surtout si elles sont poreuses, jusqu'à ce qu'elles soient complètement imbibées.

Appliquer fortement le mortier contre ces surfaces en le faisant pénétrer dans toutes les cavités et en le serrant autant que possible. Le battre même au besoin, s'il est d'une consistance suffisamment sèche, jusqu'à ce que l'eau commence à ressuer ; éviter toutefois de dépasser cette limite.

Dans les maçonneries proprement dites, serrer les joints au moyen de cales.

Pour les enduits destinés à rester à l'air, employer des mortiers aussi maigres que possible et toujours très homogènes ; *ne pas lisser les enduits.*

Ne faire subir au mortier en œuvre aucune action mécanique avant qu'il soit complètement durci ; pendant ce temps, le maintenir humide en le protégeant du soleil, du vent, des pluies abondantes, des brusques variations de température et de la gelée.

116. Additions diverses. — Dans quelques emplois particuliers, on a songé à recourir à l'addition de faibles quantités de matières étrangères, soit à l'état pulvérulent, soit en dissolution dans l'eau de gâchage, pour modifier certaines propriétés et plus particulièrement la durée de prise des mortiers. Sans nous arrêter à diverses recherches qui ne se sont guère étendues en dehors du domaine des laboratoires, nous nous bornerons à dire quelques mots des méthodes proposées pour maçonner pendant la gelée, du gâchage au chlorure de calcium et de l'addition aux ciments de faibles quantités de sulfate de chaux.

Précautions contre la gelée. — Un premier moyen consiste à gâcher les mortiers à l'eau chaude; mais, outre qu'il ne doit être efficace que si la température s'abaisse peu au-dessous de zéro, il est à craindre que l'eau chaude ne provoque une accélération de prise nuisible au bon emploi du mortier.

En Amérique [1], on a proposé, dans le même but, de gâcher les mortiers avec de l'eau sucrée. Cette pratique, employée couramment dans l'Inde depuis un temps immémorial, même à la température ordinaire, aurait en outre l'avantage d'augmenter les résistances.

Une autre méthode consiste à employer pour le gâchage une solution de carbonate de soude. D'après M. Bernhofer [2], une solution de 1 kilogramme de soude cristallisée pour 2 litres d'eau aurait permis à un mortier de chaux de faire prise par un froid de — 31°,5. D'après M. Rabut [3], une dissolution de carbonate de soude à 100 grammes par litre permettrait de maçonner par un froid de — 10 à — 15° et n'entraînerait qu'un supplément de dépense de 2^{fr},50 par mètre cube. Il en résulterait en même temps une accélération de la prise et une dessiccation moins rapide du mortier en œuvre.

Enfin, on a proposé l'emploi de solutions de chlorure de calcium.

Gachage au chlorure de calcium. — De pareilles solutions peuvent également servir dans divers cas particuliers, soit qu'on veuille ralentir ou accélérer la prise ou encore obtenir des composés acquérant rapidement une résistance considérable.

En particulier, les travaux de M. Candlot [4] ont établi les faits suivants :

« Le ciment portland gâché avec une solution contenant quelques grammes par litre de chlorure de calcium fait prise plus lentement que s'il a été gâché avec de l'eau pure. Quand la solution de chlorure est concentrée à 100-400 g. par litre, la prise est, au contraire, très rapide.....

La solution faible de CaCl a la propriété de provoquer

[1] Voir *Engineering News*, 1886 à 1891.

[2] *Wochenschrift des œsterreichischen Ingenieur-und Architekten Vereins*, 1890, n° 16.

[3] *Génie civil*, XXII, p. 178, 1893.

[4] *Annales de la Construction*, mai et juin 1888. — *Comptes Rendus de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale*, octobre 1890. — *Ciments et chaux hydrauliques*, 1891, Annexe I.

l'extinction rapide de la chaux vive. Un ciment contenant un excès de chaux, gâché à l'eau pure, gonfle et se désagrège par suite de l'expansion tardive de la chaux libre. Ce même ciment, gâché avec une solution de chlorure de calcium à 30-60 grammes par litre, ne présente pas de gonflement...........

Le durcissement que le ciment frais gâché avec la solution concentrée de CaCl est susceptible d'acquérir en peu de temps est considérable..... Il est avantageux, quand on veut faire un scellement, par exemple, de gâcher la pâte assez claire et de ne l'employer qu'au moment où elle a déjà une température élevée et où elle a pris une consistance plastique ; une fois mise en place, elle se solidifie très vite.

Le mortier de ciment gâché avec la solution concentrée de CaCl se désagrège si on le met dans l'eau quelques instants après la prise ; mais, quinze ou vingt heures après, on peut l'immerger sans qu'il perde rien de sa dureté...........

Avec un ciment éventé, la prise reste lente ; il ne se produit pas d'élévation de température et la pâte gonfle et se décompose parfois complètement. »

Addition de sulfate de chaux. — On ajoute souvent aux ciments, pour ralentir leur prise et augmenter leur résistance, de faibles quantités de sulfate de chaux, soit à l'état de gypse, soit à l'état de plâtre. Bien que cette addition soit pratiquée à l'usine et non sur les chantiers, nous l'étudierons ici, à cause de son analogie avec les précédentes. Il pourrait d'ailleurs se rencontrer qu'elle se produisît accidentellement par suite de la présence de sulfate de chaux dans le sable employé pour le mortier ou dans les moellons entrant dans la maçonnerie.

Il paraît à peu près établi par l'expérience que l'influence du sulfate de chaux est toute différente suivant qu'il a été cuit avec le ciment ou qu'il lui a été ajouté après cuisson au moment de la mouture. Dans le premier cas, son action semble faible. Dans le second, elle varie, comme celle du chlorure de calcium, suivant l'importance de l'addition.

Quelques centièmes de plâtre ou de gypse ajoutés au ciment peuvent ralentir considérablement sa prise et exalter sa résistance. Une proportion de plâtre plus forte produit les effets contraires. La tendance au gonflement augmente d'ailleurs avec la dose de sulfate de chaux cru ou cuit.

Dès que la proportion de ce corps dépasse une certaine limite, variable suivant la composition du ciment et la nature du milieu où le mortier est exposé, ce dernier finit par se fissurer et se boursoufler, puis par tomber en ruine.

Nous avons rendu compte de divers essais dans un mémoire antérieur[1], et M. Candlot en cite d'autres de son côté[2]; tous paraissent assez probants, bien qu'ayant porté sur des éprouvettes de ciment pur et de mortier sableux normal.

Le tableau ci-contre (p. 508) relate, outre quelques nouveaux essais exécutés d'après la méthode normale du cahier des charges, des expériences plus prolongées faites sur des mortiers plastiques contenant 3 parties en poids de sable P′ ($g = 0{,}10$; $m = 0{,}25$; $f = 0{,}65$) pour 1 partie de divers mélanges d'un même ciment portland et de gypse en poudre fine.

Nous citerons encore une série d'expériences faites sur divers mélanges plastiques de divers liants avec un sable calcaire moulu en farine et contenant accidentellement 3 pour 100 de son poids de sulfate de chaux (calculé anhydre). Ces mortiers ont été immergés partie à l'eau douce et partie à l'eau de mer, les uns immédiatement après le gâchage, d'autres après conservation d'un jour, quatre jours ou quatorze jours à l'air.

Sauf de très rares exceptions, les mortiers de chaux hydraulique et de ciment de laitier sont encore intacts après environ huit mois d'immersion. Quant aux ciments proprement dits, ils se sont décomposés d'autant plus vite qu'ils étaient moins cuits et que les mortiers avaient été immergés plus tôt. Avec les ciments peu cuits, la décomposition n'a pas été moindre à l'eau douce qu'à l'eau de mer.

[1] *Annales des Ponts et Chaussées*, 1890, I, p. 375.
[2] *Chaux et Ciments hydrauliques*, 1891, p. 250.

Composition des mélanges en poids	Ciment portland. / Gypse...........	100 / 0	99 / 1	98 / 2	97 / 3	95 / 5	90 / 10
Essais de prise	Début de prise de la pâte pure à l'aiguille Vicat de 300 grammes.	20 m.	4 h 30	6 h.	6 h.	5 h.	4 h 40
	Milieu de prise du mortier plastique 1 : 3 au sable P' (sonde carrée de 5 mm. de côté pesant 2.500 g.)...	9 h.	10 h.	8 h 30	14 h.	10 h.	9 h.

NATURE des mortiers d'essai	NATURE des essais	MILIEU d'exposition et ÉPOQUE de l'immersion	AGE lors des ruptures	RÉSISTANCES (en kg. par cm²)					
Pâtes pures	Traction (moy. des 3 plus fortes sur 6 briquettes)	Eau de mer (apr. 24 h.)	4 sem.	42,5	57,7	55,2	57,0*b*	26,7*b*	29,0
			1 an	65,5	58,8	58,8*c*	67,8*d*	0 *e*	22,2*d*
Mortiers normaux 1 : 3 battus	*id.*	*id.*	4 sem.	15,8	19,3	17,7	15,3*a*	6,7*a*	11,3
			1 an	23,0	23,7	25,3	24,0*d*	1,5*d*	0 *e*
Mortier plastique 1:3 au sable P' ($g = 0,10$; $m = 0,25$; $f = 0,65$)	Traction (moy. de 6 briquettes)	Eau de mer (après 7 j.)	4 sem.	11,7	10,1	9,8	10,0	3,6	3,4*d*
			12 sem.	12,1	10,7	10,9	9,3	0 *e*	0 *e*
			26 sem.	12,8	12,8	11,8	12,5	0 *e*	0 *e*
			1 an	16,1	15,9	14,3	14,9	0 *e*	0 *e*
			2 ans	19,1	20,7	19,3	20,8	0 *e*	0 *e*
			4 ans	22,3	24,9	21,9	25,4*d*	0 *e*	0 *e*
			6 ans	22,8	22,8	22,8	26,0*d*	0 *e*	0 *e*
		Eau douce (après 7 j.)	4 sem.	8,1	10,9	11,4	11,3	5,2	1,3*d*
			12 sem.	14,5	12,1	13,1	13,1	10,7	0 *e*
			26 sem.	10,8	13,1	15,4	14,3	13,9	0 *e*
			1 an	12,8	16,7	15,8	19,8	17,8	0 *e*
			2 ans	17,0	19,7	19,3	23,4	20,3	0 *e*
			4 ans	21,8	24,8	24,2	25,2	25,8	0 *e*
			6 ans	19,6	22,8	24,9	24,8	24,5	0 *e*
		Air	4 sem	9,4	11,0	14,1	12,3	9,8	9,4
			12 sem.	8,7	12,5	15,5	14,3	15,1	7,7
			26 sem.	(8,7) ?	(12,7)?	22,1	16,7	(14,4)?	9,1
			1 an	11,4	16,0	27,1	21,5	18,8	15,3
			2 ans	17,0	19,8	33,9	25,3	27,4	17,8
			4 ans	21,7	29,8	40,2	41,2	36,5	28,0
			6 ans	19,9	15,6	35,9	25,2	33,6	22,8
	Compression (moy. de 2 cubes)	Eau de mer (après 7 j.)	12 sem.	37	46	52	54	39 *c*	0 *e*
			1 an	56	63	67	70	50 *d*	0 *e*
			6 ans	103	119(*a*)?	109(*a*)?	130(*a*)?	0 *e*	0 *e*
		Eau douce (après 7 j.)	12 sem.	56	58	62	72	67	0 *e*
			1 an	87	77	95	101	116	0 *e*
			6 ans	121	131	132	159	181	0 *e*
		air	12 sem.	47	58	70	75	57	45
			1 an	77	84	91	109	83	61
			6 ans	118	118	121	132	129	104

a Légères veines. — *b* Veines. — *c* Fissures. — *d* Gonflement et fissures profondes. — *e* Désagrégation complète.

EXPLICATION DE LA FIGURE [illegible]96

DÉSIGNATION de L'ÉPROUVETTE	NATURE du LIANT	COMPOSITION DU MORTIER en poids: Liant	COMPOSITION DU MORTIER en poids: Sable impur	AUTRE EXPRESSION de la COMPOSITION: Liant	AUTRE EXPRESSION de la COMPOSITION: CaOSO3	AUTRE EXPRESSION de la COMPOSITION: Calcaire pur	TEMPS ÉCOULÉ entre LE GACHAGE et L'IMMERSION	NATURE DE L'EAU d'immersion	OBSERVATIONS
				100					
N° 1	Ciment portland de	20	80	89,2	10,8	348			
N° 2	morceaux parfaite-	25	75	91,7	8,3	267			
N° 3	ment cuits, triés spé-	30	70	93,5	6,5	226	14 jours	Eau douce	Veines peu visibles sur la figure
N° 4	cialement et broyés	35	65	94,7	5,3	198			Mortier intact
Galette	sans autre mélange.	40	60	95,7	4,3	175	immersion immédiate		
N° 5	Ciment portland de 1re qualité.........	35	65	94,7	5,3	198	1 jour		
N° 6	Ciment d'incuits.....	40	60	95,7	4,3	175	14 jours	Eau de mer	
N° 7	Ciment rapide	25	75	91,7	8,3	267	14 jours		
N° 8	Ciment de laitier.....	20	80	89,2	10,8	348	4 jours		

La figure 96, faite d'après une photographie et dont l'explication est donnée par le tableau ci-contre (p. 509), représente l'état de quelques-unes de ces éprouvettes après six mois[1].

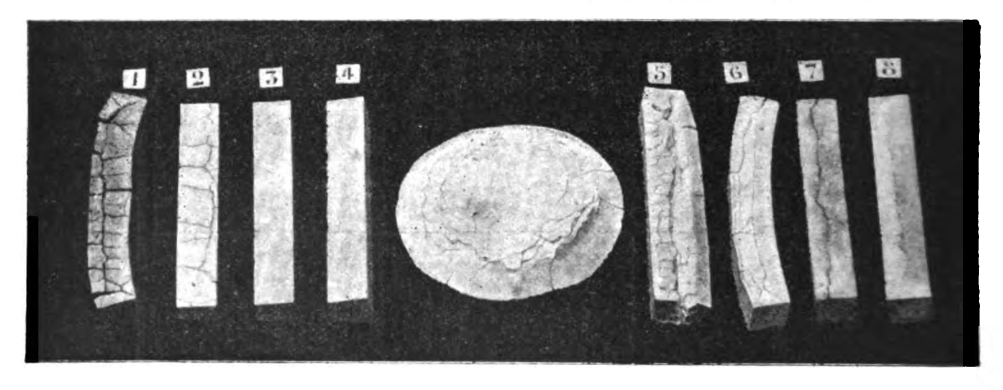


Fig. 96.

En résumé, la présence du sulfate de chaux ajouté après cuisson doit être considérée comme dangereuse dans les mortiers destinés à être immergés, surtout à l'eau de mer.

Même à l'air, une trop forte addition de ce corps peut être nuisible; par exemple, des scellements au plâtre faits dans un mur en mortier de ciment dans un lieu humide provoquent bientôt un gonflement et un ramollissement général du mortier environnant.

Il est impossible de fixer *a priori* la dose qu'on peut tolérer dans chaque cas particulier. En Allemagne, on admet comme licite une addition inférieure à 2 pour 100.

117. Examen de mortiers en œuvre. — Un des problèmes qui se posent le plus souvent, en particulier quand il s'agit de fixer la cause de dégradations survenues dans des maçonneries construites depuis plus ou moins longtemps, consiste à rechercher si un mortier a été fait avec de bons matériaux et dans quelles proportions ont été employés les éléments dont il est composé.

[1] Les prismes nos 5 et 6 se trouvaient déjà, après 8 semaines et 4 semaines d'immersion, à peu près dans l'état où ils sont représentés, et ont été alors définitivement sortis de l'eau.

Dans la plupart des cas, ce problème est insoluble.

La nature du liant ne peut être reconstituée ; tout au plus l'analyse du mortier peut-elle faire soupçonner quelquefois des teneurs tout à fait anormales en certains éléments chimiques autres que ceux, comme la chaux et la silice, qui se trouvent aussi dans les sables. L'examen du grain du mortier peut renseigner sur la nature et la grosseur du sable. Enfin un opérateur très exercé peut parfois tirer un indice plus sûr de l'aspect et de la nature des dégradations.

Quant au dosage, il ne peut être à peu près indiqué par l'analyse que si l'on connaît les compositions chimiques du liant et du sable employés (voir 1re partie de ce volume, p. 109) et si, en outre, il n'y a pas eu perte ou gain de certains éléments depuis l'emploi.

Les experts doivent donc toujours se montrer très circonspects en pareille matière.

CHAPITRE VII

BÉTONS

§ 1. — Composition

118. Béton et concrete. — Le béton est une sorte de poudingue obtenue par un mélange de mortier et de cailloux ou de pierres cassées ; c'est donc, en somme, un mortier à très gros éléments. Mais, tandis que le mortier sert, en général, à relier des moellons, le béton s'emploie seul, de manière à former, après durcissement, une masse monolithe.

Connu depuis très longtemps, son usage n'a guère pris de développement que depuis une quarantaine d'années ; il se généralise de plus en plus, principalement à l'étranger, et est appelé à faire de nouveaux progrès, grâce surtout à un procédé de construction relativement récent, qui consiste à renforcer les massifs de béton par des armatures métalliques noyées à l'intérieur (voir chap. VIII, § 3).

Sur le continent, le béton est toujours constitué de volumes bien définis de pierres et d'un mortier régulièrement dosé. En Angleterre, au contraire, on obtient ce qu'on appelle le *concrete* par l'adjonction d'une quantité déterminée de ciment à un mélange en proportions souvent non définies de sable, graviers, galets, cailloux, voire même de pierres. Le dosage est alors donné par le rapport du volume de ces matières à celui du ciment. Aussi le concrete manque-t-il souvent d'homogénéité et contient-il dans ses diverses

parties des proportions différentes des divers matériaux pierreux dont il est formé.

119. Compositions employées sur divers chantiers. — « Le béton, en France, est, suivant les circonstances, composé en volumes :

de 1 de mortier pour 2 de pierres (Marseille, Toulon) ;
de 2 de mortier pour 3 de pierres (Le Havre, Dieppe) ;
ou de 3 de mortier pour 4 de pierres (Cette).

Le dosage du mortier est variable ; il était, par mètre cube de sable, de 350 à 450 kilogrammes de ciment portland à la digue de Boulogne, de 450 kilogrammes à la nouvelle digue de Cherbourg et de 500 kilogrammes à Brest et à Cette (ciment de Lafarge).

Le dosage des mortiers de chaux du Teil par mètre cube de sable a été de 350 kilogrammes à Marseille et à Cette, de 360 à Port-Saïd et à Trieste, et de 410 kilogrammes à Toulon pour les blocs artificiels des nouvelles digues.

A Gênes, le béton constituant les blocs des digues était formé de 4 volumes et 1/2 de chaux hydraulique avec pouzzolane et de 7 de pierres cassées.

Le concrete était formé à la Tyne de 1 de ciment portland, 2 1/2 de sable et 6 1/2 de gravier et de cailloux roulés ;

à Aberdeen, de 1 de ciment, 4 ou 3 de sable et 5 ou 4 de gravier ;

à Newhaven, de 1 de ciment, 2 de sable et 5 de galet ;

à Ymuiden, autrefois, de 1 de ciment, 3 de sable et 5 de galet ; actuellement, de 2 de ciment, 3 de sable et 5 de bricaillons ou pierres cassées ;

à Columbo, de 1 de ciment, 2 de sable et 6 de pierres cassées ou gravier ;

à Douvres, de 1 de ciment et 9 de sable, graviers et galets.

A la Réunion, le béton était formé de 168 kilogrammes et 1/2 de chaux pour 368 litres de sable et 853 litres de pierres cassées, ou de 240 kilogrammes de ciment portland pour 790 litres de sable et 562 litres de pierres cassées.

A Bilbao, les blocs étaient en béton, comprenant 200 kilo-

grammes de ciment pour $0^m,45$ de sable et $0^m,90$ de pierres[1] ».

La diversité de ces bétons, destinés pourtant tous à des travaux du même genre (digues en mer), indique suffisamment qu'on n'est pas bien fixé sur la meilleure composition à adopter, composition qui doit d'ailleurs différer suivant la nature des matériaux.

Il importe donc d'étudier de près les variations dont les qualités du béton sont susceptibles selon les éléments dont celui-ci est composé et selon les proportions de ces éléments.

120. Dispositifs expérimentaux. — La principale difficulté des expériences sur les bétons réside dans la grande dimension qu'il faut donner aux blocs d'essai. La répartition des cailloux et du mortier ne peut, en effet, être la même au voisinage des parois et surtout des arêtes qu'au centre du moule, de sorte que, pour que la composition du béton moulé diffère aussi peu que possible de celle qu'il aurait si on l'employait en grandes masses, il est nécessaire d'opérer sur un volume de matière d'autant plus important que les cailloux employés sont plus gros.

Mais, à mesure qu'on prend des blocs d'essai de plus en plus volumineux, il faut, pour en déterminer les résistances, des machines de plus en plus puissantes, que la plupart des laboratoires ne possèdent pas.

Aussi, nombre d'expérimentateurs se sont-ils contentés de soumettre à des essais de compression des blocs cubiques moulés de 30, de 20 ou même de 10 centimètres de côté, beaucoup trop petits et trop anguleux pour être homogènes, quand il s'agit de bétons tels qu'on les emploie dans la pratique.

D'autres ont pu, en agissant par flexion, opérer sur des blocs plus volumineux, sans avoir à exercer de trop grands efforts. Les blocs étaient moulés sous forme de prismes qu'on posait sur deux appuis et qu'on chargeait de poids jusqu'à

[1] Baron QUINETTE DE ROCHEMONT, *Cours de travaux maritimes à l'École nationale des Ponts et Chaussées.*

rupture. Mais ce procédé prête encore à la critique en ce que la partie du prisme qui fatigue le plus, par laquelle la rupture commence, et dont la composition influe le plus sur la résistance totale, est la face inférieure, qui, par suite du moulage et pour la raison qui vient d'être indiquée, n'a pas la même composition que le cœur du béton.

Dans les expériences que nous avons faites et dont nous relaterons sommairement les principales conclusions dans la suite de ce paragraphe [1], nous avons opéré sur des blocs de béton moulés sous forme de cylindres mesurant $0^m,40$ de diamètre et $0^m,40$ de hauteur (voir, dans la figure 97, un moule et un bloc entier), forme pour laquelle le rapport de la surface extérieure au volume est un des plus faibles qu'on puisse réaliser pratiquement.

La capacité du moule étant connue exactement, on étalait au fond de celui-ci un volume connu d'argile, destinée à former matelas et à atténuer l'influence de la paroi, et dont on garnissait surtout l'arête circulaire inférieure du cylindre; puis on introduisait en plusieurs fois un poids connu de béton formé d'éléments pesés séparément avant le mélange, en pilonnant chaque fois, et on achevait de remplir exactement le moule avec du mortier de sable fin, dont on mesurait le volume introduit. Des volumes du moule, de l'argile et du mortier complémentaire, on déduisait celui du poids de béton employé, et il était facile ensuite de calculer le poids de l'unité de volume, puis, comme pour les mortiers (art. 77), la composition volumétrique élémentaire du béton.

Pour les essais de résistance, on débitait à la scie de marbrier, dans les blocs durcis, douze cubes de $0^m,10$ de côté répartis quatre par quatre en trois assises, comme l'indique la figure 98, cubes qui pouvaient être essayés à la compression avec une machine de puissance moyenne (voir *fig.* 97, plusieurs de ces cubes entiers ou après rupture). En outre, il restait deux bouts A et B (*fig.* 98) de toute la hauteur du cylindre, limités chacun par une coupe plane, qu'on gardait

[1] Nous comptons publier plus tard le compte rendu détaillé de ces expériences.

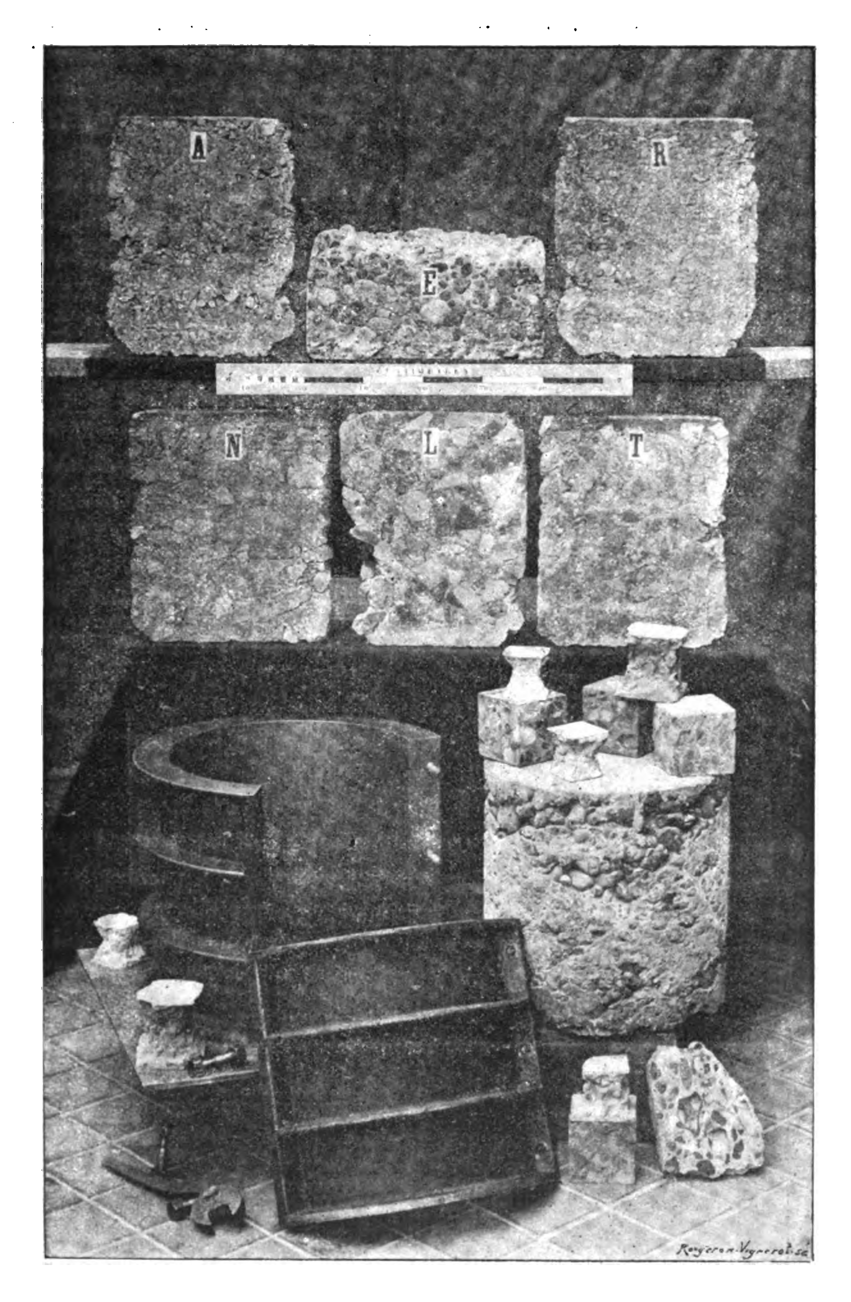


Fig. 97.

comme témoins et dont l'aspect montrait immédiatement si le béton était bien plein à l'intérieur.

La figure 97 reproduit, d'après une photographie, les coupes de six bétons différents [1].

Vu la difficulté de fabriquer un grand nombre d'aussi gros blocs et surtout de les scier, opération d'ailleurs fort coûteuse, des essais préparatoires ont été faits au moyen de bétons en miniature moulés en cubes de 7 centimètres de côté et dont les cailloux étaient constitués par des pierrettes passant à la tôle à trous de 20 millimètres et retenues par celle à trous de 10 millimètres (voir, *fig*. 97, quatre de ces cubes après écrasement). Ces pseudo-bétons, intermédiaires entre les mortiers et les bétons véritables, n'ont pas nécessairement leurs propriétés régies par les mêmes lois que les bétons de la pratique; leur étude a seulement pour but de guider les recherches, en permettant, dans certains cas, d'entrevoir des lois qu'il ne reste plus qu'à vérifier ultérieurement au moyen de mélanges formés de plus gros matériaux.

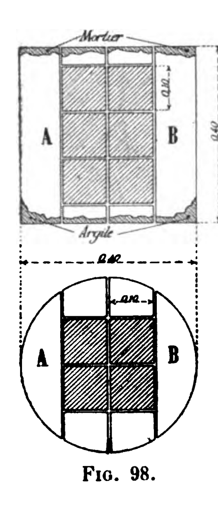


Fig. 98.

121. Pierrailles. — De même que les sables sont des ensembles de grains de différentes formes et de différentes

[1] Le tableau ci-dessous indique quelle était la composition de ces bétons; les pierrailles U et Y et les sables B et C seront définis plus loin (voir tableaux des pages 526 et 527); le sable P' est celui qui a servi pour les essais du tableau III, p. 584.

Désignation du béton sur la figure.	A	R	N	T	L	E
Nature de la pierraille	U	U	Y	Y	Pierres cassées calcaires 60-20	Galets arrondis 60-10
Nature du sable entrant dans le mortier	B	B	C	B	P'	P'
Volume de mortier par mètre cube de pierraille	0,433	0,818	0,633	0,633	0,500	»
Rapport du volume du mortier à celui des vides de la pierraille	0,834	1,578	1,234	1,234	»	»

Le bloc entier et le petit morceau appuyé contre sa base sont, comme E, des bétons de galets de silex roulés.

grosseurs, dont la composition influe sur les propriétés des mortiers, les pierrailles sont des ensembles de pierres cassées ou de cailloux de formes plus ou moins anguleuses ou arrondies et de dimensions variées. Toutefois, les différences relatives entre les grosseurs extrêmes sont bien moins accusées que dans les sables, d'où il résulte que l'influence de la composition granulométrique des pierrailles sur les qualités des bétons est moins sensible que dans le cas des sables et des mortiers.

En particulier, les volumes des pleins et des vides par mètre cube de mélanges en diverses proportions de cailloux de diverses grosseurs, varient peu en comparaison de ceux des sables.

On peut s'en rendre compte en rapprochant de la figure 73 les figures 99 et 100, qui donnent les volumes pleins réels

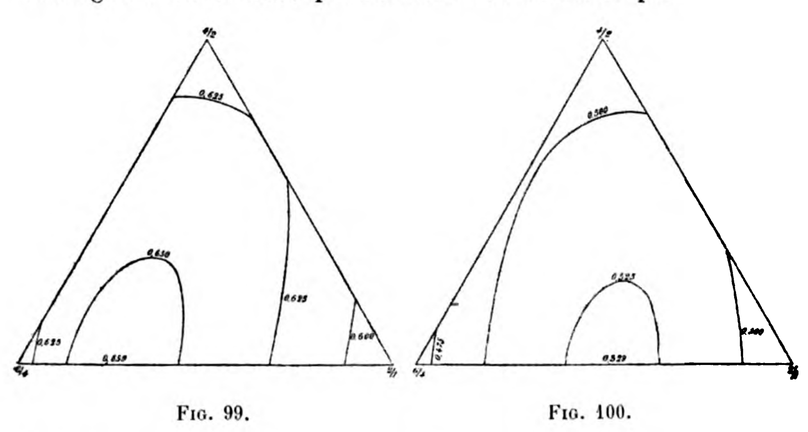


Fig. 99. Fig. 100.

de mélanges en toutes proportions (évaluées en poids) de trois catégories de cailloux limitées par des tôles perforées à trous de 6, 4, 2 et 1 centimètre de diamètre, mélanges mesurés sans tassement dans une boîte cubique de $0^m,50$ de côté.

Les expériences ont été faites, pour la figure 99, avec des galets roulés de forme arrondie et, pour la figure 100, avec des pierres cassées anguleuses ; on voit que, comme dans le cas des sables, le serrage est d'autant plus fort que les éléments sont plus arrondis.

D'autre part, les actions capillaires qui s'exercent entre les grains de sable et s'opposent plus ou moins à leur glissement, deviennent à peu près négligeables, au moins quant à leurs variations, à côté du poids relativement considérable de chacun des cailloux qui constituent une pierraille. Il ne doit donc résulter que de très faibles différences de tassement des diverses influences étrangères à la nature même de la pierraille, telles que la capacité de la mesure employée, la manière de remplir celle-ci, le degré d'humidité des cailloux, etc.

Dès lors, il y a peut-être un peu moins d'inconvénient que dans le cas des mortiers (voir art. 105) à régler le dosage des bétons d'après le volume des vides du squelette qu'on leur destine. Aussi conseille-t-on souvent d'employer un volume de mortier dépassant, suivant les cas, de 10 à 50 pour 100 celui des vides de la pierraille[1].

Toutefois, il est préférable de fixer *a posteriori* les proportions à employer de la pierraille, du sable et du liant dont on dispose, d'après les propriétés trouvées pour des bétons d'essai de divers dosages, et plus particulièrement d'après la composition volumétrique élémentaire de ces bétons.

122. Composition volumétrique élémentaire des bétons. — Cette composition est définie par cinq paramètres, qui sont les volumes absolus c, s, p, e et v du liant,

[1] Pour évaluer ce vide, on emplit de pierres un baquet de contenance connue et on mesure le volume d'eau qu'il faut ajouter pour combler les intervalles. Ce mode d'opérer comporte deux causes d'erreurs, par suite de la difficulté de chasser tout l'air et de bien déraser la surface des pierres.

La méthode par pesée et calcul du plein d'après le poids spécifique est aussi sujette à la seconde critique; de plus elle devient incertaine quand la pierraille est composée d'éléments de densités différentes.

Un procédé de mesure plus exact consisterait à employer un grand baquet, dans lequel on introduirait la pierraille de telle sorte qu'elle dépasse le niveau d'un trop-plein ménagé vers la partie supérieure, et à faire arriver l'eau par le fond du baquet jusqu'à ce qu'elle commence à déborder par le trop-plein. Le rapport du volume d'eau introduit à celui qu'il aurait fallu employer avec le baquet vide jusqu'à ce qu'elle s'écoule de même, donnerait la proportion des vides.

Dans tous les cas, le résultat obtenu est d'autant plus exact qu'on opère à la fois sur une plus grande quantité de matière.

du sable, de la pierraille, de l'eau et des vides contenus dans l'unité de volume du béton, et qu'on calcule, pour les bétons frais, de la même manière que pour les mortiers frais (art. 77), d'après la composition pondérale du béton et le poids de l'unité de volume.

Comme dans le cas des mortiers, la *compacité* d'un béton est le volume absolu de matières solides entrant dans l'unité de volume du mélange en œuvre, volume qui, à l'état frais, est mesuré par la somme $c + s + p$.

Le volume v peut d'ailleurs être décomposé approximativement en deux autres de la manière suivante :

Soient c_0, s_0, e_0 et v_0 les volumes élémentaires d'un mortier contenant les mêmes proportions pondérales de liant, de sable et d'eau que le béton, et ne différant par conséquent de celui-ci que par l'absence des cailloux ; on a nécessairement $\frac{c}{c_0} = \frac{s}{s_0} = \frac{e}{e_0}$, et la valeur commune λ de ces rapports mesure précisément le volume de mortier entrant dans un volume 1 de béton. Si donc le mortier logé entre les cailloux a le même serrage que quand il est gâché seul, le volume de ses vides par unité de volume du béton est mesuré par λv_0, de sorte que l'excès du volume total v des vides trouvés dans le béton sur ce nombre doit représenter les vides résultant de l'introduction des cailloux.

Nous distinguerons ces deux espèces de vides en appelant *pores* ceux qui préexistaient dans le mortier, et *cavités* ceux qui, plus grands mais moins nombreux, résultent du remplissage imparfait des intervalles entre les cailloux par le mortier.

Parfois le calcul des cavités conduit à des nombres légèrement négatifs : il faut en conclure simplement que, par suite du pilonnage subi par le béton, le mortier contenu a un peu moins de vides que s'il avait été gâché sans cailloux. Dès lors, il est probable qu'en général les volumes trouvés pour les cavités doivent être un peu trop faibles ; mais cela n'empêche pas les nombres qui les mesurent de fournir un renseignement utile sur la constitution des bétons.

123. Résistances. — La résistance d'un béton n'est pas toujours bien définie.

S'il a été gâché mou, de telle sorte qu'il reflue sous la dame sans subir un tassement bien appréciable, le béton présente à peu près la même résistance en toutes ses parties. Mais, si l'on a pu le damer fortement, les couches inférieures, qui ont reçu, outre leur propre pilonnage, le contre-coup de celui des couches introduites à la suite, présentent une résistance plus forte. C'est ainsi que, en ramenant à 100 la résistance moyenne des 12 cubes extraits de chaque gros cylindre, les résistances de chaque assise (moyennes de 22 cylindres, soit 88 cubes par assise) ont été les suivantes :

Assise supérieure	87
Assise médiane	102
Assise inférieure	111
Moyenne	100

Pourtant, les coupes pratiquées à la scie dans toute l'épaisseur des blocs n'indiquent à l'œil aucune différence appréciable de serrage (voir *fig.* 97).

De même, les résistances à la compression peuvent différer suivant qu'on exerce l'effort normalement aux lits ou dans leur plan. Si le béton est bien plein, les deux méthodes donnent sensiblement les mêmes résultats; mais, dès qu'il présente quelques cavités, la première conduit à des résistances supérieures à la seconde. Dans certains cas, l'écart a atteint jusqu'à 20 pour 100.

Nous avons fait trop peu d'essais de résistance sur des bétons véritables pour pouvoir affirmer que la relation trouvée, dans le cas des mortiers, entre la résistance à la compression et les volumes élémentaires, existe aussi pour les bétons. Nous avons seulement vérifié que les formules s'appliquaient encore assez bien à des bétons en miniature faits avec des pierrettes passant à la tôle de 20 millimètres et

retenues à celle de 10 millimètres[1]. En tout cas, que la résistance moyenne soit ou non une fonction du rapport $\frac{c}{1 - \text{compacité moyenne}}$, il paraît évident qu'à compacité égale, les bétons doivent être d'autant plus résistants qu'ils contiennent plus de liant, de même que, à richesse égale, leur résistance doit croître avec leur compacité.

Nous avons d'ailleurs vérifié que, comme dans le cas des mortiers, la compacité des bétons frais ne changeait pas quand on remplaçait une partie du liant par un égal volume absolu de sable fin, ou inversement. Même, quand le sable n'est pas trop gros et quand la substitution ne porte pas sur une trop grande proportion de matière, la compacité du béton se ressent à peine des variations de dosage du mortier, à condition, bien entendu, que le volume de celui-ci associé à une même quantité de pierraille reste le même.

Le problème du meilleur béton se trouve donc ramené à la recherche d'un mélange dont la composition granulométrique corresponde au maximum de compacité, puisque, quand cette composition sera connue, il suffira de remplacer

[1] D'un tableau très complet d'essais de bétons publié par M. Candlot (*Ciments et chaux hydrauliques*, tableau n° 23), nous avons pu déduire les compositions volumétriques élémentaires des bétons essayés et constater que les résistances à la compression obtenues après une même durée de conservation étaient à peu près proportionnelles au rapport $\frac{c}{e+v}$. Mais doit-on avoir grande confiance en des essais faits sur des cubes moulés de 10 centimètres de côté, quand les bétons étaient composés de pierres passant à l'anneau de 4 centimètres ?

Notre principale série d'essais de résistance a porté sur 18 blocs correspondant à des bétons de compositions différentes contenant tous, par mètre cube, environ 215 kilogrammes d'un même ciment portland ($c = 0,068$), et dont les compacités variaient de 0,776 à 0,830. Les cylindres ont été sciés après conservation d'environ onze mois à l'air, à l'abri des intempéries, mais non des variations de température ; le sciage a duré près d'un mois, puis les cubes débités ont été immergés dans l'eau douce et rompus sept jours plus tard. Les résistances à la compression (moyennes de 12 cubes) ont varié de 108 à 269 kilogrammes par centimètre carré (moyenne : 173). En admettant la formule

$$P = 2550 \left[\frac{c}{1-(s+p)}\right]^2,$$

l'écart moyen $\sqrt{\frac{\Sigma (P_0 - P)^2}{17}}$ entre les résistances P calculées et les résistances P_0 fournies directement par l'expérience serait de 33 kilogrammes, soit 19 pour 100 de la moyenne des 18 valeurs trouvées pour P_0.

l'un par l'autre des volumes absolus égaux de liant et de sable fin pour faire varier à volonté la résistance, la compacité restant la même.

124. Recherche du béton le plus compact. — Si les lois formulées plus haut dans le cas des mortiers (art. 102) continuent à être applicables, les meilleurs bétons seront obtenus avec des matériaux tels que les plus gros grains du sable soient notablement plus petits que les plus petits des cailloux, et il y aura avantage à augmenter cet écart le plus possible.

Mais le mortier employé, considéré isolément, devra lui-même être obtenu avec un sable présentant avec le ciment un écart de grosseur aussi grand que possible.

Les meilleures conditions devront donc être les suivantes :

Liant fin mélangé ou non de sable (ou d'une autre matière) de même grosseur ;

Cailloux aussi gros que possible, sans mélange de cailloux plus petits ;

Sable à grains uniformes, mais dont on ne peut fixer la grosseur *a priori*, l'écart devant être très grand à la fois avec le ciment et avec les cailloux.

Rien ne permet d'ailleurs de prévoir quelles devront être les proportions de ces trois matières, car il serait bien paradoxal d'admettre que le maximum de compacité doive correspondre encore à un mélange ne contenant pas de grains moyens, c'est-à-dire, dans le cas actuel, à un béton sans sable grenu.

Nous avons déterminé expérimentalement ces proportions et les compacités correspondantes pour plusieurs séries de trois éléments de grosseurs diversement échelonnées, dont l'un était du ciment et les deux autres des sables ou des pierrettes calibrés. Ces essais nous ont montré que, pour trois éléments donnés quelconques, les proportions correspondant au pseudo-béton le plus compact différaient suivant les grosseurs relatives des grains. Le ciment et les plus gros grains (pseudo-pierraille) restant les mêmes, il

faut prendre une proportion d'autant plus forte du premier et d'autant plus faible des seconds que les grains intermédiaires (représentant le sable du béton) sont plus gros. La compacité maximum est d'ailleurs la plus forte quand la grosseur des grains moyens ne se rapproche trop ni de celle du ciment ni de celle des gros grains, et ce *maximum maximorum* croît lui-même avec la grosseur de ces derniers.

Les figures ci-dessous correspondent à une série de bétons

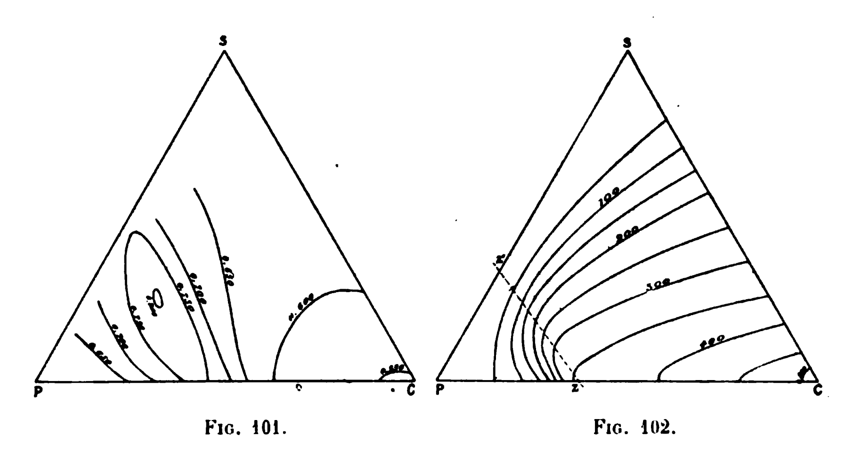


FIG. 101. FIG. 102.

en miniature obtenus en combinant en toutes proportions une même pseudo-pierraille (pierrettes 20-10 représentées par le sommet P), un même sable (sable P' représenté par le sommet S) et un même ciment portland (sommet C).

La figure 101 représente la variation des compacités et montre que le maximum a eu lieu pour un mélange contenant, en poids, environ 0,55 de pierrettes, 0,25 de sable et 0,20 de ciment.

La figure 102 représente les résistances à la compression atteintes par les mêmes pseudo-bétons après immersion de douze semaines à l'eau douce. En traçant la droite ZZ', lieu géométrique des mélanges dans lesquels le volume absolu des pierrettes est double de celui du sable et du ciment réunis, on remarque que, pour tous les bétons contenant une proportion moindre de pierrettes, les lignes d'égales résistances s'écartent peu de droites passant par le sommet P;

autrement dit, les résistances sont à peu près les mêmes que celles des mortiers sans pierrettes. Au contraire, il résulte de l'allure des courbes dans le triangle PZZ' que la résistance diminue rapidement dès que le volume absolu des pierrettes dépasse les deux tiers du volume absolu total des matières solides employées [1].

125. Influence de la composition du béton. — Nous avons fait une série assez complète d'expériences sur des bétons dans lesquels un même ciment était combiné à des sables et à des pierrailles de mêmes natures, mais de compositions granulométriques différentes.

Les sables avaient été obtenus en tamisant de diverses manières un même sable de Seine, comme l'indique le tableau ci-dessous :

DÉSIGNATION du sable	MODE DE PRÉPARATION	COMPOSITION APPROXIMATIVE en poids		
		reste sur 10mm	10mm — 1mm	passe à 1mm
A	Sable brut	1/7	3/7	3/7
B	Le même, passé à la tôle à trous de 10 millimètres de diamètre	0	1/2	1/2
C	Le même, passé à la tôle à trous de 1 millimètre de diamètre	0	0	1
D	Résidu du sable B sur la tôle à trous de 1 millimètre de diamètre	0	1	0
E	Sable moulu à une finesse comparable à celle du ciment.			

Les pierrailles, formées de pierres compactes cassées en morceaux, étaient composées comme il suit :

[1] On remarque que la ligne ZZ' s'écarte peu du lieu géométrique des points de contact des tangentes menées aux lignes de niveau parallèlement au côté PS ; elle donne donc à peu près les compositions des bétons de résistance maximum correspondant à un même dosage en ciment (en poids).

Il est inutile de répéter que ces conclusions, déduites de bétons en miniature particuliers, ne s'appliquent pas nécessairement aux bétons proprement dits.

DÉSIGNATION de la PIERRAILLE	COMPOSITION EN POIDS					POIDS du MÈTRE CUBE (sur 1/8 de m. cube)	VOLUME des VIDES
	PIERRES CASSÉES				PIERRETTES restant sur 10mm [1]		
	90 — 60	60 — 40	40 — 20	20 — 10			
						kg.	
X	1	0	0	0	0	1233	0,531
Y	2/7	3/7	2/7	0	0	1280	0,513
Z	2/3	0	1/3	0	0	1322	0,498
U	0	0	1/2	1/2	0	1265	0,519
V	0	0	0	0	1	1410	0,468
S [2]	0,466	0	0	0	0,534	1546	0,414

[1] Pierrettes plus ou moins arrondies résultant du tamisage du sable A à la tôle de 10 millimètres et contenant seulement 6 pour 100 de leur poids de cailloux retenus par la tôle de 20 millimètres.

[2] Mélange à volumes égaux de cailloux 90 — 60 et de pierrettes V. Cette proportion est celle qui, d'après des expériences préparatoires, correspond au minimum des vides de tous les mélanges qu'on peut faire avec les deux mêmes matériaux.

Les dosages des mortiers étaient calculés de telle sorte que tous les bétons continsent, après pilonnage, sensiblement un même poids de 215 kilogrammes de ciment par mètre cube [1].

La figure 103 rend compte de la plupart des résultats obtenus ; pour la construire, on a pris pour abscisses les dosages des bétons, exprimés par le rapport du volume de mortier employé à celui des vides de chaque pierraille ; on a porté en ordonnées les valeurs trouvées pour la compacité, puis on a joint par des lignes continues les points correspondant aux bétons de divers dosages obtenus avec une même pierraille et un même sable.

Les principales conclusions qui s'en dégagent sont les suivantes :

Les pierrailles X, Y et Z, dont les plus gros éléments sont les mêmes mais en proportions différentes, donnent, avec un même sable, des bétons dont les compacités sont représentées par des points d'une même courbe.

[1] Les mortiers au sable D contenaient tous, en volumes absolus, 2/3 de ce sable et 1/3 de divers mélanges de ciment et de sable E. Les mortiers aux sables A, B ou C ne contenaient pas de sable E.

On a vu un peu plus haut que la teneur du mortier en ciment influait peu sur la compacité des bétons.

Une quelconque de ces pierrailles donne, avec les différents sables, des bétons d'autant moins compacts que le sable contient une plus forte proportion de grains fins (comparer les cinq courbes tracées en traits pleins).

Si l'on combine à un même sable deux pierrailles de grosseurs différentes, celle qui contient les plus gros éléments donne les bétons les plus compacts (comparer la courbe (XYZ)B et la courbe UB).

Une même pierraille et un même sable donnent, pour des proportions de mortier croissantes, des bétons dont la

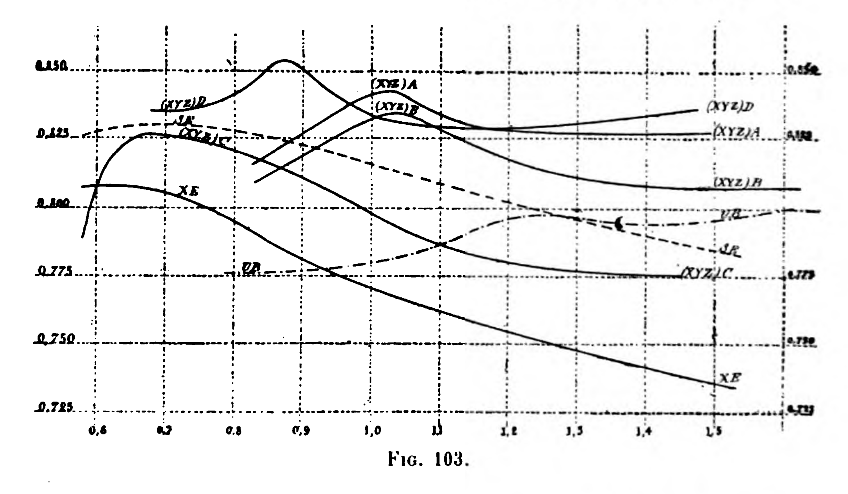


Fig. 103.

compacité passe par un maximum pour un dosage variable suivant la nature des matériaux mélangés, puis décroît régulièrement, non sans manifester parfois une tendance à se relever pour les bétons très gras. Le maximum correspond d'ailleurs souvent, surtout avec les sables fins, à des bétons trop maigres pour qu'on puisse en recommander l'emploi. Si, parmi les bétons aux pierrailles X, Y, Z et aux sables A, B, C, D, on ne considère que ceux qui sont d'un emploi pratique, en laissant de côté ceux qui correspondent aux branches de courbes situées à gauche des sommets, on reconnaît que leurs compacités sont d'autant plus faibles que la proportion de ciment et de sable fin est plus forte. En outre, le volume total de leurs cavités varie dans le

même sens que leur compacité, sans jamais dépasser 0,030.

D'autres essais ont été faits en mélangeant en diverses proportions trois éléments de grosseurs nettement tranchées, savoir la pierraille X, les pierrettes V et des mortiers au sable E. Pour un même rapport du volume du mortier à celui des vides des pierrailles constituées par la réunion des éléments X et V, la compacité a été d'autant plus forte que la pierraille, mesurée seule, contenait moins de vides (comparer les courbes XE et SE). Mais, si l'on rapporte tous les bétons au poids total π de sable E et de ciment contenu dans un poids 1 de mélange sec, on s'aperçoit que la compacité et le volume des cavités sont indépendants des proportions relatives des cailloux et des pierrettes et décroissent proportionnellement aux accroissements de π suivant les formules :

$$\text{Compacité} = 0{,}928 - 0{,}0038\pi$$
$$\text{Cavités} = 0{,}049 - 0{,}0012\pi \ [1]$$

Quelques bétons faits avec la pierraille S et les sables B et C ont d'ailleurs eu des compacités supérieures à celles qui auraient été données par les courbes XB et XC. Toutefois, ce résultat, de même que la différence de position des courbes XE et SE, ne doit pas être considéré comme infirmant la première loi formulée ci-dessus, relative à l'équivalence des pierrailles dans lesquelles les plus gros éléments sont les mêmes, car on peut admettre que les bétons à la pierraille S contiennent, en réalité, la pierraille X et un sable résultant de l'addition des pierrettes V aux sables B, C ou E et, par conséquent, moins riche en grains fins que ces derniers.

En résumé, les conclusions générales à tirer de ces diverses observations paraissent être les suivantes :

1° *Pierraille :* A dosage égal exprimé comme dans la figure 103, la composition de la pierraille influe peu sur la compacité du béton, tant qu'on ne change pas la dimension

[1] De ces deux égalités on déduit : Eau + pores = $0{,}0050\ \pi - 0{,}023$.

de ses plus gros éléments, et ladite compacité augmente en même temps que cette dimension.

2° *Mortier :* La compacité du béton varie en raison inverse de la teneur du mortier en ciment et en grains fins de sable.

3° *Dosage :* Pour la grande majorité des bétons réellement pratiques, la compacité décroît quand on augmente la proportion de mortier combinée à une même quantité de pierres (Rapprocher cette proposition des observations tirées de la figure 102).

Il semble donc qu'il y ait intérêt à augmenter autant que possible la grosseur de la pierraille, à diminuer la teneur du mortier en grains fins et à combiner à la pierraille la plus petite dose de mortier correspondant encore à un béton bien lié.

En France, les cahiers des charges imposent ordinairement l'emploi de cailloux ou de pierres cassées pouvant passer dans tous les sens à travers un anneau de 60 millimètres de diamètre et ne passant pas à l'anneau de 20 millimètres. Nous croyons que, dans bien des cas, la limite supérieure pourrait avantageusement être augmentée. Par exemple, quand il s'agit de massifs d'une épaisseur un peu forte et faciles à damer, l'augmentation du volume individuel des pierres ne doit présenter d'autre inconvénient qu'une difficulté un peu plus grande de manipulation et une usure plus rapide des appareils servant à la fabrication du béton. Il est même extrêmement économique de noyer dans le béton des grosses pierres ou moellons formant bourrage[1]. Au contraire, dans certains travaux d'exécution plus

[1] Dans un mémoire ayant pour titre : *The introduction of Rubble Blocks into concrete Structures*, publié dans les *Minutes of Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 1893, M. J. W. Steven rapporte que l'introduction de gros blocs dans les proportions de 20,0, 63,6 et 30,3 pour 100 du volume du massif final a abaissé les prix de revient de 16,7, 48,0 et 18,0 pour 100. A son économie, ce procédé joint, d'après le même auteur, l'avantage d'accélérer le travail, en ce qu'il dispense d'attendre, pour chaque assise, que les couches inférieures aient atteint une certaine consistance.

Il est fort probable qu'il ne serait pas sans danger si le massif avait à supporter des efforts de traction.



délicate, par exemple quand le béton doit être coulé sous l'eau, de trop gros éléments risqueraient de se séparer du reste de la masse et pourraient nuire à sa liaison. Dans tous les cas, il importe de fixer une limite inférieure; autrement il serait à craindre que la pierraille contînt des éléments fins ou même du sable, qui amaigrirait le mortier et troublerait les dosages.

A grosseur maximum égale, il y a avantage à choisir une pierraille de composition granulométrique telle que le volume de ses vides soit le plus petit possible, puisqu'on réduit ainsi la quantité de mortier à introduire.

Enfin, pour le choix de la composition du mortier et de sa proportion relativement à la pierraille, il existe, d'après M. Mahiels, deux pratiques bien distinctes, consistant à remplir les vides du squelette, soit partiellement d'un mortier riche en ciment, soit complètement d'un mortier relativement maigre. Bien qu'on puisse obtenir ainsi deux bétons de même résistance et de même prix, la seconde méthode doit être préférée à cause de l'homogénéité de la masse obtenue et de sa moindre perméabilité.

126. Influence de la proportion d'eau employée pour le gâchage. — Avec les bétons bien pleins, c'est-à-dire contenant une proportion de mortier suffisante pour qu'il ne reste pas de cavités entre les cailloux, une augmentation de la quantité d'eau a simplement pour effet de rendre le mortier plus poreux et moins résistant, mais sans apporter à la compacité du béton d'autre modification que celle qui résulte de cette altération du mortier.

Au contraire, avec les bétons maigres, une augmentation modérée de l'eau de gâchage favorise sensiblement le tassement des matières, sans doute par suite de la plus grande fluidité du mortier, et conduit par conséquent à de plus grandes valeurs pour la somme $c + s + p$.

Il résulte de là notamment que le maximum de compacité doit correspondre à une composition plus riche en pierraille quand le béton est convenablement mouillé et pilonné que quand il est trop sec.

Il est impossible de définir *a priori* la quantité d'eau convenant le mieux à des proportions données de matières : on la calcule quelquefois en ajoutant au volume d'eau entrant dans le mortier celui qui est nécessaire pour mouiller la pierraille ; mais, outre que ce dernier volume est lui-même difficile à définir, cette méthode conduit à une proportion trop forte pour les bétons riches en mortier et trop faible pour les bétons maigres. Le meilleur volume total à employer dépend d'ailleurs des conditions dans lesquelles le béton peut être damé sur chaque chantier. S'il est difficile d'obtenir un bon pilonnage, comme, par exemple, pour les bétons coulés sous l'eau, il importe de forcer la dose en mortier et d'employer une proportion d'eau suffisante pour que le mélange ait une certaine plasticité ; au contraire, si les ouvriers ont toutes leurs aises, une trop forte proportion d'eau et de mortier donne un béton qui reflue sous la dame et se serre mal.

On doit donc déterminer dans chaque cas la proportion d'eau par des essais préalables. La meilleure solution nous paraît être de rechercher une consistance telle que l'eau commence à ressuer quand le béton a subi le pilonnage maximum compatible avec les conditions spéciales dans lesquelles le travail est exécuté.

A une quantité moindre correspondrait un béton moins compact ou même mal lié ; au contraire, un excès d'eau appauvrit le mortier et le rend plus poreux, s'oppose à l'action du damage, facilite la séparation du mortier et des pierres pendant le transport du béton au lieu d'emploi, enfin peut entraîner une partie du ciment en s'échappant par les fentes des coffrages.

127. Influence de la forme des cailloux. — Au sujet de cette influence, les avis sont partagés, faute d'expériences suffisamment probantes.

Les figures 99 et 100 ont montré qu'à composition volumétrique égale, une pierraille présentait d'autant moins de vides qu'elle était composée d'éléments plus arrondis. Il en résulte que si, à un même volume de pierraille, on ajoute

un même volume de mortier, on aura des bétons plus gras et plus plastiques avec les cailloux ronds qu'avec les pierres cassées.

De même, si l'on règle la teneur en mortier sur le volume des vides, les cailloux ronds, exigeant moins de mortier, donneront un béton à la fois plus compact et plus économique, en même temps que mieux lié et se pilonnant plus facilement, par suite de l'aptitude qu'ont les cailloux à glisser les uns contre les autres.

Nous n'attachons d'ailleurs que peu de crédit au reproche qu'on leur fait quelquefois d'offrir au mortier moins de prise que les pierres cassées ; il semble notamment résulter des essais en petit qui seront cités à l'article ci-après, que ces cailloux ne doivent modifier la résistance du béton que par l'influence favorable de l'augmentation de compacité résultant de leur emploi.

128. Influence de la nature de la pierraille. — On a vu plus haut (art. 99) que la nature chimique ou minéralogique des sables n'exerçait généralement qu'une faible influence sur les propriétés des mortiers. *A fortiori* celle des pierres entrant dans les bétons doit-elle être à peu près indifférente.

Au contraire, l'état physique de ces dernières peut, dans certains cas, jouer un rôle plus ou moins important. Ainsi, des pierres perméables ou gélives peuvent compromettre la sécurité de bétons exposés aux intempéries.

D'une manière générale, les matériaux poreux exigent, pour être bien humectés et adhérer solidement au mortier, une quantité d'eau beaucoup plus forte que les autres, ce qui entraîne une diminution de la compacité et, par suite, de la résistance du béton.

L'état plus ou moins lisse de la surface des pierres doit avoir une influence minime, car la résistance du béton dépend sans doute beaucoup moins de l'adhérence du mortier aux pierres que de la résistance propre du mortier, et la désagrégation résultant d'efforts mécaniques ne peut guère commencer que par la rupture des alvéoles.

Pour la même raison, la dureté propre du squelette paraît devoir être aussi de peu d'importance, au moins quand la proportion de mortier est suffisante pour que les cailloux n'aient entre eux que peu de points de contact; par contre, il serait peut-être dangereux d'employer des matériaux tendres, tels que des bricaillons, dans des bétons caverneux dont la résistance serait due en partie à l'arc-boutage des cailloux les uns contre les autres.

Le choix de matériaux légers ou pesants doit être subordonné à l'emploi auquel chaque béton est destiné. Par exemple, pour des planchers ou des murs de maisons, le béton doit être aussi léger que possible : il peut alors être formé de scories, de coke, de laitier, etc., corps qui, en outre, rendent possible l'introduction de clous dans la masse solidifiée. Au contraire, quand la stabilité de la construction dépend du poids du massif, comme dans un grand nombre de travaux hydrauliques, il y a lieu de rechercher les matériaux les plus lourds.

COMPOSITION DES BÉTONS en poids				NATURE des PIERRETTES				
Pierrettes 20 — 10	Sable P'	Ciment		Silex [1]	Grès silicéo-calcaire [2]	Quartzite [3]	Meulière compacte [4]	Bricaillons [5]
50	40	10	Eau de gâchage... p. 100	7,9	8,4	7,6	8,1	17,4
			Compacité	0,784	0,762	0,741	0,735	0,562
			Résistance [6]. kg. par cm^2	67	80	78	84	(64)
60	8	32	Eau de gâchage .. p. 100	8,8	9,3	9,0	9,5	20,5
			Compacité	0,793	0,764	0,756	0,731	0,513
			Résistance [6]. kg. par cm^2	377	347	342	352	144
70	18	12	Eau de gâchage... p. 100	4,8	6,1	5,7	5,9	18,7
			Compacité	0,775	0,709	0,646	0,655	0,476
			Résistance [6]. kg. par cm^2	(135)	(102)	(52)	64	37

1 Pierrettes roulées de forme à peu près ronde.
2 Pierre cassée, moins dure et plus grenue que les deux suivantes.
3 Morceaux lamelleux.
4 Arêtes vives.
5 Arêtes mousses.
6 Résistances à la compression après douze semaines de conservation dans l'eau douce. Chaque résistance est la moyenne de six cubes. Pour les quatre nombres mis entre parenthèses, les résistances individuelles ont présenté des écarts importants.

Nous avons fait quelques expériences sur des bétons en miniature de mêmes compositions, où entraient des pierrettes de même grosseur, mais de natures différentes. Le tableau ci-contre (p. 534) montre que les compacités de ces bétons ont surtout dépendu de la forme des pierrettes et de la quantité d'eau qu'il a fallu employer pour les gâchages, et que, à dosage égal, les résistances ont à peu près suivi les compacités.

129. Rendement des bétons. — On appelle rendement, le volume de béton en œuvre fourni par l'unité de volume de pierraille. La connaissance de cet élément est surtout utile pour l'établissement des devis et le calcul des prix de revient.

Le tableau suivant indique, d'après M. Mahiels, les valeurs approximatives du rendement de bétons à divers dosages faits avec diverses catégories de pierrailles.

TITRE	DEUX VOLUMES MORTIER MÉLANGÉS A	UN MÈTRE CUBE DE CAILLOUX DONNERA EN BÉTON SUIVANT LE TITRE DU DOSAGE			
		GALETS RONDS		PIERRES CASSÉES	
		variés	égaux	variées	égales
		mètre cube	mètre cube	mètre cube	mètre cube
2 : 3	3 volumes cailloux........	1,350	1,320	1,250	1,220
2 : 4	4 volumes cailloux........	1,220	1,160	1,100	1,080
2 : 5	5 volumes cailloux........	1,080	1,040	1,000	1,000

§ 2. — Fabrication des bétons [1]

130. Préparation des matériaux. — Les matériaux du mortier ayant été étudiés dans le chapitre précédent, il

[1] Pour les questions traitées dans ce paragraphe, de même que pour une foule de renseignements pratiques sur la composition et les applications du béton, nous renvoyons le lecteur à l'ouvrage très complet de M. A. Mahiels, ingénieur civil attaché à la construction des 21 forts belges de la Meuse : *Le Béton et son emploi* : Liège ; A. Bénard, éditeur, 13, rue Lambert-le-Bègue, 1893.

ne reste plus à parler que de la préparation des pierrailles.

Cette préparation diffère suivant qu'il s'agit de galets roulés ou de pierres cassées.

En général, les galets proviennent de plages ou du lit des rivières, d'où on les extrait plus ou moins mélangés de sable ainsi que d'éléments trop gros pour pouvoir être utilisés tels quels.

Le triage peut être fait à la main ou par des moyens mécaniques.

Dans le premier cas, un ouvrier jette à la pelle les matériaux bruts sur une claie derrière laquelle un autre les recueille. Une double opération est nécessaire pour enlever le trop gros et le trop fin. D'après M. Mahiels, ce procédé est d'un rendement déplorable, et un homme produit à peine trois mètres cubes par jour.

Le triage mécanique peut être pratiqué sur la drague même qui extrait les matériaux ou sur la rive. La matière brute est déversée par les godets de la drague ou par une noria spéciale sur un système de trois tôles inclinées superposées, la première à larges trous, qui conduit les cailloux trop gros dans un chaland ou dans un wagonnet et laisse passer tous les autres, la seconde à trous fins, qui sépare de même la pierraille du sable et l'envoie d'un autre côté, la dernière pleine, sur laquelle le sable glisse vers un troisième véhicule.

La préparation des pierres cassées peut être faite à la main, au moyen de marteaux, ou à la machine, soit dans des concasseurs à mâchoires, soit entre des cylindres horizontaux munis de dents d'acier et tournant rapidement en sens inverse. La séparation par grosseurs se fait encore au moyen de claies ou de tôles perforées. Le concassage mécanique paraît n'être économique que sur les chantiers très importants, fournir des pierres moins régulières que le concassage à la main et donner plus de déchet.

Même à l'état frais, les galets, bien qu'extraits de l'eau, sont souvent plus ou moins vaseux et les pierres cassées peuvent contenir de leur propre poussière. *A fortiori*, s'ils sont approvisionnés depuis un certain temps, les cailloux

ont pu être souillés de poussière ou de terre; il importe donc, dans tous les cas, de les laver soigneusement avant l'emploi pour les débarrasser des impuretés qui nuiraient à l'adhérence.

Un procédé très pratique est de les arroser à la lance ou sous un robinet, dans des brouettes à claire-voie qui servent en même temps à les mesurer.

Après un léger égouttage, on les mène à l'atelier de fabrication du béton encore mouillés, précaution indispensable pour qu'ils se lient bien avec le mortier.

131. Malaxage. — Comme il a été déjà dit, l'homogénéité du béton exige que le mortier soit préparé séparément, avant l'introduction des cailloux. La proportion d'eau à employer pour le gâchage de ce dernier dépend alors de la nature et de la destination du béton.

Comme pour les mortiers, le malaxage peut être fait à bras ou à la machine.

La première méthode, qui ne doit être employée que sur les chantiers de peu d'importance, consiste à étaler sur une aire plane des couches alternatives de pierres mouillées et de mortier et à brasser le tout ensemble à plusieurs reprises, au moyen de pelles et de griffes ou de rateaux. Pour que le mélange soit bien homogène, il convient de n'opérer à la fois que sur des quantités relativement faibles.

Les divers dispositifs mécaniques servant à la fabrication du béton peuvent être classés en deux catégories, suivant que le mouvement des matières résulte de l'application d'une force extérieure quelconque ou se produit spontanément par le seul effet de la pesanteur.

Les premiers consistent généralement en cylindres tournant autour de leur axe légèrement incliné sur l'horizon et dans lesquels le mortier et les cailloux sont introduits simultanément dans les proportions voulues. Pour empêcher la séparation des matières par ordre de densités, des barres transversales, des râteaux ou des hélices, solidaires du cylindre mobile ou de son axe, divisent et brassent la masse à chaque révolution. Dans d'autres cas, le cylindre est

fixe et les palettes seulement tournent à l'intérieur. Parfois, deux cylindres sont superposés, le plus élevé pour la fabrication du mortier, le second pour son mélange avec les pierres.

Quelques bétonnières sont montées sur roues de manière à être facilement déplacées à mesure de l'avancement du travail.

En Angleterre, où l'on consomme des quantités de béton considérables, on juge inutile de fabriquer le mortier séparément. Souvent les cailloux, le sable et le ciment sont puisés mécaniquement à leurs tas respectifs dans les proportions voulues ; ils se mélangent à sec dans la première moitié du cylindre, puis reçoivent l'eau nécessaire et continuent à être malaxés, à l'état de béton, dans le reste de leur parcours.

Les deux principaux types de bétonnières utilisant le poids même des matériaux sont le *couloir caisse*, imaginé par M. Krantz, qui l'employa pour la première fois à Alger en 1842, et le *couloir cylindrique*, conçu par M. Schlosser et d'un emploi très répandu.

Ces appareils sont de longs tubes verticaux ouverts à leur extrémité supérieure pour l'introduction du mortier et de la pierraille et présentant à leur partie inférieure un orifice, muni ou non d'un obturateur, pour l'écoulement du béton terminé.

Le premier, dont la section est rectangulaire, est muni intérieurement de plans inclinés superposés en sens contraires, sur lesquels les matières viennent glisser successivement en se retournant à chaque chute. Parfois, chacune de ces chicanes est composée de deux éléments plans formant alternativement gouttières et dos d'âne, de sorte que les parties de matière réunies par les unes sont disjointes par les autres.

Le second appareil est un cylindre vertical en tôle traversé par des échelons disposés les uns au-dessous des autres, suivant des diamètres de ses sections horizontales et dans des orientations différentes, de manière que les extrémités de ces barreaux forment deux hélices conjuguées sur le cylindre.

La chute des matières se trouve aussi contrariée, ce qui favorise le mélange des cailloux et du mortier. Le tube se termine par un tronc de cône où le béton se rassemble avant de sortir.

Avec ces deux couloirs, la manipulation des matériaux s'opère sur un plancher disposé au niveau de leur orifice supérieur. Il est avantageux de recouvrir cet orifice d'un couvercle en tôle sur lequel on étale des couches alternatives de mortier et de cailloux et que l'on retire ensuite brusquement, de manière à précipiter dans le vide des matières déjà en partie mélangées.

De même, il est commode d'installer une voie à l'étage inférieur, sous l'orifice de sortie, pour pouvoir recueillir directement le béton dans des wagonnets.

D'après M. Mahiels, à qui nous empruntons la plupart des détails qui précèdent, on doit donner la préférence aux couloirs, surtout au second, sur les bétonnières horizontales. Tandis que ces dernières sont d'un prix très élevé et consomment une force motrice considérable, les premiers sont des engins beaucoup plus frustes, tout en donnant des bétons d'aussi bonne qualité.

132. Mise en œuvre. — Quelle que soit la nature du travail à exécuter, une des conditions essentielles dont dépend la qualité du béton est la rapidité de sa mise en œuvre. Il importe en effet, non seulement que le liant n'ait pas encore commencé sa prise au moment de l'emploi, mais même que celle-ci soit aussi peu avancée que possible lorsqu'on commencera une nouvelle assise, de manière qu'il s'établisse une liaison parfaite entre les couches consécutives d'un même massif. On doit donc mettre en place le béton aussitôt après sa fabrication, en évitant notamment les trop longs trajets, pendant lesquels sa masse, soumise à des trépidations, pourrait perdre son homogénéité première, les cailloux gagnant le fond de la brouette ou du wagonnet, tandis que l'eau et le ciment remonteraient à la surface ou même s'échapperaient si le véhicule n'était pas parfaitement étanche. En même temps, un emploi rapide est souvent plus

économique, par suite de la diminution des frais généraux.

Le mode d'emploi diffère suivant que le travail est exécuté à l'air (libre ou comprimé) ou sous l'eau.

Dans le premier cas, si la masse de béton ne doit pas être tout entière noyée dans le sol, on commence par établir un *coffrage* en charpente, moule étanche destiné à la limiter et qui sera enlevé après la prise en laissant à nu les parois du monolithe. On arrive ainsi à établir des blocs de formes très compliquées ; tel est le cas notamment des bâtis de machines à vapeur, dans lesquels doivent être prévus d'avance et d'une manière précise les logements et les dégagements des différents organes de la machine. La construction du coffrage est souvent l'opération la plus délicate, la plus longue et la plus coûteuse du travail, car il est à peu près impossible de retoucher la masse solidifiée, de sorte qu'il importe de bien donner au moule la forme exacte que l'on désire obtenir. En outre, celui-ci doit toujours être très solide, pour résister sans déformations à la poussée du béton et aux secousses résultant du pilonnage.

Le béton frais est basculé dans la fouille ou le coffrage, retourné sommairement à la pelle, s'il est nécessaire, et réparti dans l'emplacement qu'il doit occuper. Il est ensuite pilonné à bras au moyen de pilons ou de dames pesant de 8 à 15 kilogrammes et dont la base mesure de $0^m,12$ à $0^m,18$ de diamètre. Il convient de procéder par petits coups répétés plutôt que par des chocs violents qui risqueraient de désagréger les couches inférieures déjà en partie solidifiées. Dans les angles, le béton est bourré au moyen de bâtons ayant de $0^m,06$ à $0^m,08$ de côté au gros bout.

Pour que la compression se répartisse bien dans toute l'épaisseur des assises, il importe que celle-ci ne dépasse pas $0^m,20$ à $0^m,30$.

En principe, les couches doivent être horizontales et subir un pilonnage normal à leur direction, c'est-à-dire vertical. Pourtant, dans le voisinage des parois, on doit aussi pilonner perpendiculairement au fruit. Dans certains travaux de longue haleine, un pilonnage double est nécessaire; il

s'exerce alors et sur la couche et sur le talus d'avancement [1].

On est parfois conduit, pour diminuer la surface des joints et n'avoir pas à étaler le béton sur une étendue horizontale trop développée, à régler l'ouvrage par portions à peu près verticales ayant l'épaisseur totale de la construction ; plutôt que de raccorder les couches consécutives par des plans obliques ou verticaux qui, en cas d'adhérence imparfaite, détermineraient des joints capables de compromettre la solidité du massif, il est avantageux de composer chaque couche d'une série d'assises horizontales pilonnées à la suite les unes des autres et de la limiter latéralement par un joint en escalier.

Dans tous les cas, si, en raison de l'importance de l'ouvrage ou des conditions particulières du chantier, on ne peut entreprendre chaque couche qu'après que la précédente a déjà fait prise, on doit auparavant repiquer soigneusement cette dernière, la nettoyer et la laver. Parfois même, on sépare les deux couches par un peu de mortier frais destiné à faciliter la liaison.

Quand le bétonnage est terminé, il faut attendre, avant d'enlever le coffrage, que la masse ait acquis une solidité suffisante pour ne pas être ébranlée par cette opération et pour se tenir seule sans déformation. La durée d'attente varie dans d'assez larges limites suivant la nature de l'ouvrage, la composition du béton et les conditions atmosphériques.

Si des parements doivent rester vus, on les recouvre souvent d'un enduit qui bouche leurs cavités et leur donne meilleur aspect. Cet enduit doit alors être appliqué, après mouillage du parement, aussi tôt que possible après le démoulage.

Pour les ouvrages qui ne peuvent être exécutés que dans l'intervalle des marées et sont recouverts par l'eau le reste du temps, la rapidité d'emploi s'impose encore plus que partout ailleurs. En outre, on doit recouvrir le béton mis en

[1] M. Mahiels signale un artifice qui consiste à lancer le béton contre le coffrage : les cailloux rebondissent à une certaine distance, tandis que le mortier se plaque contre les planches et donne, après l'enlèvement de celles-ci, une paroi bien régulière.

œuvre pendant chaque marée d'une couche de ciment rapide, que l'on dégrade à la marée suivante avant la reprise du travail proprement dit.

Le coulage des bétons sous l'eau présente des difficultés particulières : les matériaux risquent de se séparer, pendant leur chute, par ordre de densités ; on est loin d'avoir les mêmes commodités qu'à l'air pour les étaler et les pilonner convenablement au fond de l'eau ; enfin il se forme par le contact du liant et de l'eau une matière crémeuse, appelée *laitance*, qui nuit considérablement à la liaison des couches successives.

Le tableau ci-dessous indique les compositions que nous avons trouvées en divers points d'une couche de laitance, d'une épaisseur de 0m,09 environ, formée dans l'eau de mer à la surface d'un béton de ciment portland fraîchement coulé. L'échantillon L a été prélevé à la partie inférieure de la couche de laitance, près du béton ; il était gris et assez ferme ; l'échantillon M provenait de la partie médiane, plus claire et moins compacte ; enfin l'échantillon N, pris dans la partie voisine de l'eau, était blanc et friable. Les analyses ont été faites sur les matières préalablement séchées à 110°.

	PROPORTIONS EN POIDS			PROPORTIONS EN ÉQUIVALENTS		
	L	M	N	L	M	N
Magnésie	1,5	2,3	3,0	4 } 100	6 } 100	8 } 100
Chaux	47,7	50,2	49,7	96	94	92
Alumine	4,9	5,1	5,0	5	5	5
Sexquioxyde de fer	1,9	1,9	1,9	1	1	1
Eau	8,7	11,6	11,7	54	68	68
Acide carbonique	5,0	6,2	7,2	13	15	17
Silice	29,6	21,6	19,9	55	38	34
Acide sulfurique	0,7	1,1	1,6	1	1	2
	100,0	100,0	100,0			

Diverses méthodes ont été employées pour essayer de

remédier aux multiples inconvénients qui viennent d'être signalés : leur étude, qui a été traitée en détail dans d'autres ouvrages de cette *Encyclopédie* [1], nous conduirait trop loin de notre sujet principal. Nous rappellerons seulement en quelques mots les principes sur lesquels elles reposent.

Dans le coulage *en talus*, on introduit dans la fouille, au moyen d'un tuyau, une première masse de béton plastique, jusqu'à ce que ce béton déborde un peu la surface de l'eau ; puis on comprime de nouveau béton au dessus, de manière à le refouler à l'intérieur du premier, ce qui fait avancer le talus sans changer la surface mouillée. A chaque reprise du travail, on balaie cette surface pour enlever la laitance qui s'y est formée et on opère sur une nouvelle masse de matière que l'on bourre de même en avant de la première.

Un autre mode de coulage consiste à verser le béton dans une sorte de gouttière étanche dont l'orifice supérieur aboutit entre deux chalands et qui, plongeant jusqu'au fond de l'eau, le protège du contact de cet élément. Divers dispositifs permettent de faire avancer progressivement l'orifice inférieur.

Pour les profondeurs plus grandes, le béton est introduit dans des caisses fermées, descendues au moyen de grues au fond de l'eau, où un déclenchement spécial les ouvre et leur permet de se vider.

Quand on applique ces deux derniers procédés, on doit, autant qu'on le peut, balayer la surface du béton avant chaque addition de nouvelle matière et tasser celui-ci avec de longs pilons ou des rouleaux, en évitant toutefois de le battre, ce qui ferait remonter l'eau et le ciment à la surface.

Enfin, un autre mode de fondation repose sur l'emploi de sacs remplis partiellement de mortier ou de béton, qui, suivant leurs dimensions, sont rangés à la main par des scaphandriers ou coulés au moyen de chalands à double-fond. Ces sacs, qui ont une certaine plasticité, se moulent

[1] Voir aussi un ensemble de mémoires publiés simultanément, avec la discussion à laquelle ils ont donné lieu, par la Société des Ingénieurs civils de Londres : *Concrete as applied in the construction of Harbours. — Min. of Proceed. Inst. civ. Eng.*, Vol. LXXXVII, pp. 65 à 240 ; 1886.

les uns au-dessus des autres et forment, après la prise, des masses compactes. En Angleterre notamment, on en a employé de dimensions considérables, pesant jusqu'à 100 tonnes et au dessus.

CHAPITRE VIII

APPLICATIONS[1]

§ 1. — Mortiers et bétons a petits éléments

133. Maçonneries. — L'emploi de beaucoup le plus important des mortiers est de lier entre eux des matériaux plus gros pour former ce qu'on appelle des maçonneries.

Tantôt ces matériaux sont des moellons bruts de formes irrégulières, que l'on dispose de manière qu'il reste entre eux le moins possible d'intervalles à remplir par le mortier; il convient alors d'introduire après coup dans ce dernier des pierres plus petites ou cales, qui tiennent de la place et serrent le mortier en le faisant pénétrer dans les plus petites cavités. Tantôt les moellons sont plus ou moins dressés sur une ou plusieurs de leurs faces. Tantôt enfin on emploie des matériaux de formes régulières, tels que des briques ou des pierres de taille. Le mortier ne constitue plus alors que des joints de faible épaisseur que l'on fait souvent en mortier maigre et dont on dégrade, après l'achèvement de l'ouvrage, la partie voisine des parements extérieurs, pour la remplacer par un mortier plus riche (rejointoyage).

[1] Cette question a été traitée avec de nombreux détails dans l'ouvrage *Der Portland-Cement und seine Anwendungen im Bauwesen* (Berlin, Kommissions-Verlag von Ernst Toche, 1892), publié par l'Association des Fabricants de portland allemands, ouvrage dont nous avons résumé divers passages dans plusieurs des articles de notre premier paragraphe.

Dans tous les cas, il importe que les matériaux soient propres et aient été parfaitement imbibés d'eau avant l'emploi. C'est ce que Vicat exprimait dans le précepte devenu classique : *Mortier sec et matériaux mouillés*. Grâce à cette précaution indispensable, on obtient une adhérence parfaite, et il n'est pas rare de constater que des fissures produites dans d'anciennes maçonneries soit par des tassements, soit par des chocs extérieurs, se propagent à travers les pierres ou surtout les briques sans suivre les joints. On a même observé ce fait pour des maçonneries en moellons de granit, malgré la grande dureté de cette matière et le peu de prise que sa surface lisse semble devoir offrir au mortier.

Nous ne pouvons nous étendre plus longuement ici sur l'importante question des maçonneries, qui d'ailleurs a été traitée avec beaucoup de détails dans divers ouvrages spéciaux, et notamment par M. Denfer dans cette même *Encyclopédie*.

Nous ajouterons seulement que, pour certains travaux sous l'eau, les maçonneries, au lieu d'être exécutées sur place, sont construites à l'air, sur un chantier spécial, sous forme de gros blocs qu'on laisse durcir et se carbonater le plus longtemps possible et qu'on transporte ensuite, au moyen de puissants engins, à leur place définitive.

134. Enduits, joints extérieurs et scellements. — Quels que soient la qualité du ciment et le soin apporté à l'application de l'enduit, il ne faut pas compter uniquement sur ce dernier pour protéger d'une détérioration plus ou moins rapide une maçonnerie dans laquelle d'autres éléments seraient de qualité insuffisante. On doit, par exemple, éviter l'emploi de matériaux capables de produire des efflorescences salines, de même que, dans certains cas, de pierres poreuses qui, par l'humidité qu'elles attireraient dans les murs, pourraient, dans les temps de gelée, provoquer le décollement de l'enduit. En pareil cas, le ciment serait dépensé en pure perte, et il vaudrait mieux recourir à un liant moins coûteux, tel que la chaux.

Avant d'appliquer un enduit, on doit parfaitement nettoyer et laver la maçonnerie, jusqu'à ce qu'elle soit bien imprégnée d'eau, afin d'augmenter l'adhérence du mortier et d'empêcher les retraits dus à l'absorption de son eau et les fissures qui en résulteraient.

Plus le mortier est maigre, mieux les grains de sable qui y entrent s'opposent, par leur arc-boutage réciproque, à la production de retraits et de veines. Il faut donc éviter les mortiers riches, sans toutefois recourir à des enduits trop poreux, qui pourraient être gélifs. A ce point de vue, on emploie parfois avec succès des mortiers contenant peu de ciment et beaucoup de sable et dont on a augmenté la plasticité par l'introduction d'un peu de sable très fin ou de chaux.

Le lissage, avec la truelle ou tout autre corps dur, des enduits et des joints extérieurs, forme à leur surface un mince glacis de ciment pur, ou au moins de mortier riche, qui ne subit pas de la même manière que le reste du mortier les changements de volume résultant des variations de température, ce qui est une nouvelle cause de fissures. Aussi ne doit-on pas pratiquer cette opération : on peut la remplacer par une simple pression ou par le frottement d'un corps mou, par exemple d'une taloche garnie de feutre.

Pour la même raison, on doit éviter de faire les rejointoiements avec un liant autre que celui du reste du mortier et, autant que possible, donner aux enduits toute leur épaisseur en une seule fois, et non les former de plusieurs couches superposées.

Le séchage devant être très lent, il convient, pour les travaux extérieurs, d'opérer de préférence au printemps ou à l'automne et de protéger au besoin le mortier du vent et du soleil.

On peut d'ailleurs augmenter la dureté des enduits et leur résistance aux intempéries en les imbibant de diverses solutions, par exemple de silicates alcalins ou de fluates (v. p. 266).

Quand l'enduit est destiné à être vu, on doit éviter les reprises, qui, surtout avec les ciments, se traduisent géné-

ralement par de brusques changements de ton, ainsi que l'emploi de liants peu homogènes ou pouvant prendre, comme les ciments de laitier, des teintes désagréables. De même, on recommande quelquefois de faire en mortier de chaux les joints des parements maçonnés qui doivent rester visibles, à cause des colorations que le ciment peut communiquer aux parties voisines des pierres en s'y infiltrant.

Dans l'intérieur des appartements, on doit, sauf dans quelques cas spéciaux, préférer les enduits de chaux à ceux de ciment. La dureté de ces derniers les rend plus sonores, s'oppose à l'introduction des clous et, par suite, gêne l'application des boiseries et des tentures. En outre, la peinture et les papiers y adhèrent mal.

Enfin, on doit prendre garde, dans les divers travaux d'architecture, que les mortiers de chaux ou de ciment attaquent le plomb et aussi un peu le zinc, et par conséquent isoler ces métaux des mortiers, soit par des couches de papier, soit de toute autre manière. Du reste, l'inégale dilatabilité thermique de ces matériaux est une autre cause pour laquelle il faut éviter de les rendre directement solidaires les uns des autres.

Dans les constructions navales, on emploie souvent, pour protéger les tôles et les rivets des fonds contre l'action des eaux de la cale, des enduits imperméables de ciment additionné généralement de briques, de cubes de bois ou, plus économiquement, de fraisil. La surface supérieure de la couche est dressée en plan, entre chaque cloison transversale étanche, avec pente sur l'arrière, de manière à conduire les eaux à la pompe d'épuisement.

L'exécution des scellements au mortier exige à peu près les mêmes précautions que celle des enduits. Il convient seulement de faire usage de mortiers plus riches, renforcés par des cales en pierre dure, pour augmenter leur résistance. Nous avons signalé plus haut le danger des scellements au plâtre dans les mortiers de ciment, ou inversement.

135. Coloration des enduits. — Pour obtenir des enduits d'une couleur uniforme, on peut introduire des

matières colorantes en poudre dans les mélanges employés à la fabrication du mortier. Toutefois, la couleur se trouve ternie par celle des autres matériaux, surtout dans les mortiers de ciment, et, d'autre part, le nombre des pigments non attaqués par les éléments alcalins du mortier est assez restreint.

Quand il s'agit de colorer des mortiers ayant fait prise, bien des précautions sont nécessaires pour que la couleur adhère et ne s'altère pas au bout d'un temps plus ou moins long.

Le principal inconvénient des peintures à l'huile est que la chaux préexistant dans les liants à l'état libre ou mise en liberté par la prise, saponifie l'huile et enlève ainsi toute solidité à la couche de peinture. Il importe donc qu'elle ait été neutralisée au préalable.

En premier lieu, on doit attendre que le mortier soit parfaitement sec ; il serait désirable qu'on pût toujours lui laisser passer un été et un hiver avant d'être peint. Puis, pour lui enlever toute trace d'alcalinité, on le lave avec une eau légèrement acidulée (de préférence acide sulfurique à 1 : 100) ou avec une solution de carbonate d'ammoniaque (à 2 : 100), on rince à plusieurs reprises à l'eau pure pour enlever les sels solubles qui se sont formés et on applique la peinture après un nouveau séchage.

Toutes les matières colorantes ne conviennent pas également : celles qui sont d'origine organique s'altèrent à la longue, et même certaines couleurs minérales doivent être écartées.

On peut encore employer, pour la neutralisation de la chaux, une solution de silicate alcalin, qui a en outre l'avantage d'augmenter la dureté de l'enduit [1].

L'usage des silicates, préconisé en premier lieu par Kuhlmann, a été appliqué de diverses manières à la coloration des enduits. En général, on commence par appliquer sur la surface à colorer, préalablement bien séchée, frottée et poncée, une couche de quelques millimètres seulement

[1] On doit donner la préférence au silicate de potasse, à cause des efflorescences de carbonate de soude qui résulteraient de l'emploi du silicate de soude, et qu'il faudrait laver avant de peindre.

d'épaisseur d'un mortier spécial, destiné à servir de *fond* à la peinture, mortier qui doit être poreux, pour que celle-ci s'y imprègne profondément, et d'une teinte aussi claire que possible, pour que le ton des couleurs qu'on y appliquera ne se trouve pas modifié. On le compose le plus souvent de chaux ou de ciment et de farines de marbre, de quartz, de pierre ponce, de matières pouzzolaniques, etc. Ce fond est généralement silicatisé à son tour, puis lavé, poncé et poli avec des poudres de plus en plus fines. Quand il est bien pris, on y applique les couleurs délayées soit à l'eau soit au silicate. Dans le premier cas, l'opération se termine par un fixage au moyen d'une solution de silicate de potasse (additionné quelquefois de potasse caustique) projetée en poussière. On arrive ainsi a exécuter sur tout enduit de mortier, aussi ancien qu'il soit et quelle qu'en soit la nature, voire même sur des maçonneries de pierres ou de briques, des peintures d'une grande finesse, telles que des motifs d'ornement ou même des tableaux, qui sont très solides et peuvent être lavées sans inconvénient.

Contrairement à ces procédés, d'invention récente, qui permettent à l'artiste de travailler sans se presser, la peinture à la fresque, déja connue des anciens, exigeait que les matières colorantes fussent appliquées sur le mortier avant qu'il ait eu le temps de durcir; les couleurs se trouvaient fixées par la formation d'une mince pellicule de carbonate de chaux résultant de l'action ultérieure de l'air sur la chaux du mortier, et qui communiquait à ces peintures l'aspect mat et vaporeux qui en fait le principal charme. Malheureusement elles résistent mal aux injures du temps, surtout sous nos ciels moins cléments que ceux de la Grèce et de l'Italie [1].

136. Travaux d'étanchement. — Quand il s'agit d'aveugler des sources dans le fond d'un bassin ne présentant que des veines imperceptibles, il suffit souvent, après

[1] On trouvera beaucoup de détails sur les divers procédés auxquels il vient d'être fait allusion dans l'ouvrage de FEICHTINGER : *Chemische Technologie der Mörtelmaterialien*, pp. 346 et 432.

avoir mis à sec la surface à réparer, de la saupoudrer de ciment pur.

Si un courant d'eau s'écoule par les fissures, une couche plus ou moins épaisse de ciment à prise rapide peut être nécessaire.

Si ce moyen ne suffit pas encore, le travail devient plus compliqué : on est obligé de détourner provisoirement le courant dans des rigoles, que l'on bouche ensuite successivement avec du mortier, après la prise de la réparation proprement dite. On peut encore, dans certains cas, enfoncer de place en place dans le sol des tubes de fer, où l'eau s'élève jusqu'à un certain niveau, puis reste stationnaire; on verse alors dans ces tubes des coulis de ciment qui pénètrent assez loin dans la nappe souterraine et arrêtent le débit des sources, ou au moins le réduisent suffisamment pour faciliter l'application d'un enduit.

Pour lutter contre l'humidité des murs, le moyen le plus simple auquel on songe tout d'abord est de revêtir leur face interne d'enduits de mortier riche, voire même de ciment pur, travail qui reste souvent inefficace. Des enduits contre la face extérieure, directement exposée à la source d'humidité, réussissent généralement mieux, quoique pourtant pas toujours complètement. Toutefois cet insuccès relatif doit être attribué, dans bien des cas, à un manque de précautions lors de l'application de l'enduit. La surface doit être en effet débarrassée par un grattage à fond des efflorescences, des mousses et des diverses matières qui peuvent la souiller, ainsi que des anciennes couches de mortier ayant perdu leur consistance, puis être lavée à plusieurs reprises et légèrement séchée avant de recevoir le nouvel enduit de mortier.

Quand l'afflux de l'eau est trop abondant, il peut être nécessaire de mettre à nu la face externe du mur et de détourner provisoirement le courant. Si l'on ne peut y réussir, on fait l'enduit par petites portions, en réduisant progressivement la surface encore perméable, on y fait passer un tube pour l'écoulement de l'eau, on achève l'enduit autour du tube et, suivant la nature de l'ouvrage, on laisse cet orifice ouvert ou on le bouche avec un tampon.

L'étanchéité des viaducs de chemins de fer est particulièrement difficile à obtenir à cause des ébranlements produits dans la maçonnerie ou le béton par le passage des trains. On a cherché à rendre ces ouvrages imperméables au moyen d'enduits de ciment appliqués sur des couches de béton ou sur une double épaisseur de briques liées par du mortier de ciment, enduits recouverts parfois eux-mêmes d'un corroi d'argile. Les résultats obtenus n'ont généralement pas été satisfaisants. Des revêtements d'asphalte ont paru produire de meilleurs effets.

Pour empêcher des bassins de grandes dimensions ou des canaux de perdre leur eau, le procédé le plus efficace consiste à revêtir leur cuvette d'un corroi de béton recouvert d'une chape de mortier; souvent, après que la prise est terminée, on protège cette chape par une couche de terre.

On a vu plus haut que, pour les murs de quai baignés par l'eau de mer, l'imperméabilité était une des principales conditions de durée. L'un des moyens auxquels on a le plus souvent recours pour l'obtenir consiste à former leurs parements extérieurs de grosses pierres de taille jointoyées avec des mortiers riches, de manière à donner à l'eau aussi peu d'accès que possible. Mais cette protection n'est pas parfaite et peut disparaître assez facilement si le parement est endommagé par quelque choc. La sécurité est notablement augmentée si l'on recouvre la face postérieure du mur d'une couche imperméable d'argile ou d'asphalte.

Dans tous les cas, le plus sûr est de ne pas accorder trop de confiance aux moyens de protection extérieurs et de commencer par donner aux mortiers et aux bétons une composition qui les rende aussi étanches que possible par eux-mêmes.

137. Dallages, pavages et carrelages. — Pour l'établissement de ces ouvrages, il est nécessaire que la couche supérieure, exposée directement aux frottements et aux chocs, repose sur une assise formant matelas entre elle et le sol proprement dit. On emploie à cet effet soit une couche de béton de gravier de 6 à 10 centimètres d'épaisseur,

soit simplement un lit de sable, de gravier, de coke ou même de sciure de bois, d'épaisseur variable selon les circonstances[1].

Pour les dallages, on étend au-dessus du lit de petit béton une couche de 1 à 3 centimètres d'épaisseur d'un mortier riche formé le plus souvent de poids égaux de ciment et de sable. Le ciment doit être à prise lente. Le sable doit être dur, grenu sans être trop gros, à grains à peu près uniformes et anguleux; des grains ronds ou de grosseurs variées s'arracheraient plus facilement de leurs alvéoles. Le mortier ne doit pas être trop mou ; on le dame légèrement ou on le presse sans trop le lisser. Il est prudent d'y tracer des quadrillages pour limiter les fissures qui pourraient s'y produire à la longue par suite de retraits ou de tassements.

Après la prise, il convient de recouvrir le mortier d'une épaisse couche de sable, que l'on maintient humide pendant plusieurs jours avant de livrer le dallage à la circulation. Ce procédé est appliqué couramment à la construction de préaux, de cours, de passages, d'allées, de pistes vélocipédiques, de trottoirs, etc.

On fait même, dans plusieurs villes du bassin du Rhône, des chaussées en ciment qui se montrent d'un bon usage; les épaisseurs des deux couches sont alors un peu plus fortes ; pour ne pas interrompre longtemps la circulation, on recouvre le dallage, après la prise, d'une épaisse couche de sable, surmontée elle-même d'un plancher provisoire, sur lequel les voitures peuvent passer sans inconvénient et qu'on enlève au bout de deux mois.

Les chaussées en asphalte ou pavées peuvent être également fondées sur une couche de béton de gravier recouverte ou non de mortier. Ce procédé est employé notamment pour les pavages en bois, entre les joints desquels on coule en outre un mortier mou. La Ville de Paris se sert, à cet effet, principalement de ciment de laitier.

[1] Il importe de ne jamais faire reposer directement un dallage sur une construction appelée à subir des déformations élastiques.

Si l'ouvrage est soumis à des sous-pressions d'eau, on peut être amené à donner à l'assise de béton une forme spéciale, par exemple celle d'une voûte renversée.

Au lieu d'appliquer le mortier sur place en une nappe ininterrompue, on se sert parfois, pour les trottoirs, cours, etc., de dalles fabriquées d'avance et qu'il ne reste plus qu'à poser. Une couche de sable suffit généralement comme assise. Les dalles, dont l'épaisseur est en moyenne d'environ 7 centimètres, sont formées de mortier moulé et damé, puis abandonnées, avant l'emploi, à un durcissement aussi prolongé que possible dans un lieu humide, à l'abri des courants d'air et des variations brusques de température.

Par économie, on les forme généralement de deux couches, l'une, épaisse, de mortier maigre, l'autre, plus mince, de mortier riche, appliquées l'une sur l'autre avant la prise de manière à se souder parfaitement. Les conditions auxquelles le ciment et le sable doivent satisfaire sont les mêmes que plus haut.

Dans les appartements, on peut garnir le sol ou les murs de carreaux en ciment. Ces carreaux, qui peuvent être d'une seule couleur, présenter des dessins polychromes, ou encore rappeler la mosaïque, sont moulés sous pression après qu'on a donné à leur face destinée à être vue la préparation nécessaire pour obtenir l'effet voulu. Les colorations sont obtenues par des mélanges de divers pigments au ciment, et les mosaïques par l'introduction dans le mortier de petits cubes de marbre ou de ciment coloré. Souvent les carreaux sont imprégnés de diverses solutions, par exemple de silicate alcalin, et poncés, sur leur face principale, au moyen de grès ou d'autres matières à grains de plus en plus fins.

Les dallages en mosaïque s'obtiennent en logeant dans une aire de mortier riche de petits cubes de marbre de diverses couleurs ; quand le mortier est suffisamment durci, on dresse la surface en la frottant énergiquement comme il vient d'être dit jusqu'à ce qu'elle soit bien lisse, puis on l'enduit d'une encaustique ou d'un vernis quelconque.

138. Pierres artificielles. — Les procédés employés à la fabrication des pierres artificielles sont innombrables [1].

[1] Beaucoup sont décrits dans l'ouvrage déjà cité de Feichtinger, pp. 416 à 431.

Tout d'abord, il y a lieu de les séparer en deux grandes classes, selon qu'ils réalisent l'adhérence des matières sous l'action du feu ou au moyen de divers agglomérants.

Les premières de ces pierres artificielles, que l'on obtient par cuisson (briques) ou par fusion (laitiers moulés à la sortie du haut-fourneau), ne rentrent pas dans le cadre de cette étude. Quant aux autres, elles peuvent être subdivisées en différentes catégories, suivant la nature des matières destinées à coller ensemble les matériaux inertes, généralement pierreux, qui constituent leur squelette.

Beaucoup de composés sont basés sur l'emploi de diverses substances d'origine organique, principalemeut de brai, d'asphalte ou de résine ; ils sont généralement moulés sous pression ou même soumis à l'action de la chaleur.

D'autres, reposant sur la découverte de M. Sorel (v. p. 265), ont pour liant de la magnésie faiblement calcinée, gâchée avec une solution de chlorure de magnésium ou d'acide chlorhydrique; suivant le résultat à obtenir, on y incorpore de l'étoupe, de l'émeri, du kaolin, des débris de marbre, d'ardoise, de granit, etc.

M. Ransome a obtenu des pierres artificielles en trempant dans une solution de chlorure de calcium une pâte moulée composée de sable et de silicate de soude dissous, puis chassant par un lavage à grande eau le chlorure de sodium formé. Plus tard, il a modifié son procédé en ajoutant à la solution de silicate de la silice soluble naturelle, du sable et de la chaux ou des matières contenant de la chaux. Cette base se combine à la silice du silicate, dont la soude, mise en liberté, s'unit à son tour à la silice naturelle en produisant de nouveau silicate, et cet échange se continue jusqu'à épuisement de la chaux ou de la silice.

Enfin, un grand nombre de pierres artificielles doivent leur cohésion à la chaux ou au ciment, quelquefois au plâtre, et ne sont autres que des mortiers ou des bétons à petits éléments moulés et souvent comprimés. La nature et les proportions du liant et des matières inertes sont extrêmement variables; en dehors des sables et graviers naturels ou artificiels, on emploie les substances les plus diverses, telles

que la pierre ponce, le mâchefer, le liège ou le laitier[1]; on cherche surtout à utiliser ainsi les résidus encombrants de diverses industries. Parfois on augmente la dureté par l'action de certains liquides, parmi lesquels figurent le plus souvent l'acide sulfurique étendu et des solutions d'alun, de sulfate de fer ou de silicates alcalins.

Les plus célèbres de ces pierres artificielles ou agglomérés sont les *bétons Coignet*, fabriqués en comprimant fortement et avec des soins tout particuliers des mélanges parfaitement homogènes et peu mouillés de menues pierrettes avec une quantité de chaux ou de ciment juste suffisante pour envelopper ces dernières et les faire adhérer entre elles. On obtient ainsi des masses extrêmement compactes et d'une grande dureté, qui peuvent servir comme pierres de taille artificielles, briques, chaînes d'angles, voussoirs, dalles, bornes, bordures de trottoirs, etc., ou même être moulées en massifs monolithes importants, comme on l'a fait dans les conduites de la dérivation de la Vanne, notamment dans la traversée de la forêt de Fontainebleau.

139. Fabrication d'objets divers. — On tend de plus en plus à fabriquer en mortier de ciment moulé une foule d'objets de toute espèce employés dans l'architecture, l'ornementation, les travaux publics, l'industrie et maints usages domestiques. Ce procedé est en effet beaucoup plus économique, dans la plupart des cas, que la taille de la pierre, et le mortier, quand il est fabriqué judicieusement, peut atteindre des qualités analogues à celles de cette dernière, tant par sa résistance aux intempéries que par son aspect décoratif.

Les procédés de fabrication sont ordinairement les mêmes que ceux dont il vient d'être question à propos des pierres artificielles. Il convient de n'employer que des ciments lents de qualité supérieure et de choisir la grosseur du sable ou des pierrettes d'après la nature de l'objet à obtenir. En principe,

[1] Il convient de citer notamment des briques obtenues en humectant légèrement et agglomérant sous pression des mélanges de chaux et de laitier broyé ou granulé.

on doit éviter les mortiers trop riches ou trop mous, qui ont toujours tendance à se fendiller à la longue. De même on doit, autant que possible, opérer le moulage sous pression, ce qui permet de réduire encore la proportion d'eau et augmente la cohésion du mortier.

Quand l'objet doit présenter une surface lisse ou des détails d'une certaine finesse, on est généralement tenté d'employer un mortier riche, voire même un coulis de ciment rapide, que l'on applique alors à la manière du plâtre à mouler; c'est là un procédé défectueux, qui donne des pièces poreuses et sans durée ; il est bien préférable de composer, avec un bon ciment à prise très lente et du sable fin additionné ou non de matière colorante, un mortier de dosage moyen un peu mou, dont on garnit les parois du moule, et par-dessus lequel on introduit immédiatement un mortier sec, que l'on tasse énergiquement, de manière à bien le lier à la couche superficielle et à lui faire absorber l'excès d'eau de cette dernière.

Dans tous les cas, il importe de ne démouler les pièces qu'après la prise complète et de les laisser ensuite durcir pendant plusieurs semaines à l'abri du vent et du soleil, en les maintenant constamment humides.

Les objets moulés en ciment dont l'emploi est peut-être le plus répandu sont des tuyaux pour conduites de liquides ou de gaz, analogues à ceux qu'on fait en poterie, mais plus épais et plus résistants. On les construit par bouts pouvant s'emboîter les uns dans les autres ou être liés par des joints spéciaux, formés aussi le plus souvent de mortier de ciment. L'usage paraît avoir établi qu'en général ces tuyaux résistaient à l'action des principaux résidus ménagers et industriels, notamment aux acides dilués et à l'ammoniaque ; aussi s'est-on également servi de mortier de ciment pour enduire l'intérieur de tuyaux en fonte et les rendre inattaquables. Inversement, on a construit des tuyaux en mortier avec âme de verre, qui ont l'avantage de donner peu de prise aux incrustations et de diminuer considérablement les pertes de charge résultant du frottement de l'eau.

De même, on fait en mortier des pierres d'évier, des

auges, des mangeoires et des bassins employés dans diverses industries, notamment des cuves à bière ou à vin. Quand les liquides peuvent être altérés par la chaux ou les alcalis du ciment, on peut revêtir l'intérieur de ces bassins de plaques de verre dont une des faces a été dépolie et enduite de mortier, ce qui leur permet d'adhérer solidement aux parois.

On a proposé de couler d'une seule pièce en mortier de ciment des cercueils munis de tuyaux d'échappement pour les gaz, qui seraient évacués par des canalisations spéciales établies dans les cimetières.

Le ciment moulé se prête à la fabrication de toutes sortes d'ornements architecturaux, tels que balustres, fûts de colonnes, chapiteaux, statues, bas-reliefs, socles, vases décoratifs, cheminées, monuments funéraires, vasques, fontaines, rocailles, etc.

Mais c'est surtout dans la construction des édifices qu'il a trouvé le plus d'applications. En dehors des pierres artificielles proprement dites, briques spéciales, dalles et carreaux, dont il a été question dans les articles précédents, on peut encore citer les encadrements de portes et de fenêtres, marches d'escalier, pots de cheminée, tuiles, chaîneaux, frontons, moulures et motifs de décoration de toute espèce.

§ 2. — Bétons proprement dits

140. Fondations. — Grâce à sa plasticité, à son étanchéité et à son emploi facile aussi bien sous l'eau qu'à l'air libre, le béton se recommande d'une manière particulière pour tous les travaux de fondation. Tantôt on creuse jusqu'au sol solide des puits que l'on remplit de béton et que l'on peut ensuite relier les uns aux autres soit par un mur plein encore en béton, soit par des arches sur lesquelles reposera la construction. Tantôt on enfonce des pilotis dont on empâte les têtes dans une masse monolithe de béton qui

les maintient et assure leur solidarité, tout en présentant une assise solide à la construction projetée. Tantôt on supprime même complètement les pilotis et l'on applique sur le terrain compressible une masse de béton large et épaisse, qui répartit uniformément les pressions. Quand la surface à couvrir est très étendue, il est économique de ne faire en béton que le fond et les parois d'une vaste caisse que l'en remplit de sable.

Pour les fondations à établir sous l'eau, le béton seul permet d'opérer par coulage direct, sans qu'il soit nécessaire d'assécher la place au préalable ni de construire un bâtardeau coûteux. On commence par draguer jusqu'au terrain solide, puis on coule le béton, par l'un des procédés mentionnés à l'article 132, en une nappe ininterrompue limitée par le talus même de la fouille ou par des lignes de pieux ou de palplanches, qu'il n'est d'ailleurs pas nécessaire de faire jointifs. On peut encore travailler à sec à l'abri d'un bâtardeau et se servir de celui-ci comme coffrage.

Ces procédés s'appliquent à la construction de l'infrastructure d'une foule d'ouvrages, tels que radiers, murs de quai, réservoirs, écluses, barrages, tunnels, ponts, édifices, etc.

141. Béton employé comme remplissage. — Quand un travail comporte la construction de massifs volumineux, il est quelquefois sans inconvénient et toujours économique de faire les parois de ces massifs en maçonnerie soignée ou en béton riche et de remplir l'intérieur de béton maigre formant bourrage. Ce mode de construction, qui est particulièrement en faveur en Angleterre, est appliqué notamment pour le remplissage de puits de fondation, de murs de quai, de tympans de voûtes, ou même pour l'éxécution presque complète d'ouvrages dont seules les parties vues sont formées de matériaux plus décoratifs, par exemple de ponts avec intrados et bandeaux de voûtes en pierres appareillées.

On emploie encore le béton à combler le vide intérieur d'enveloppes métalliques auxquelles il donne du poids et de

la solidité. Tel est le cas notamment du remplissage des chambres de travail dans les fondations à l'air comprimé. On laisse alors le plus souvent l'enveloppe en tôle, qui, jusqu'à ce qu'elle soit détruite par la rouille, protège la surface du massif contre l'action directe de l'eau.

Pour les reprises en sous-œuvre, où il s'agit souvent de boucher des cavités irrégulières et d'un accès difficile, le béton convient parfaitement : il est en effet d'un maniement facile, épouse complètement la forme des anfractuosités, se lie bien aux anciennes maçonneries et peut être appliqué même sous l'eau.

Enfin, il peut être employé de même pour consolider des terrains qui, par suite de crevasses ou d'affouillements, inspireraient des craintes quant à leur résistance.

142. Ouvrages exécutés entièrement en béton. — La propriété qu'a le béton de former après la prise une masse monolithe de grande dureté, pouvant affecter les formes les plus compliquées sous des volumes considérables, tend de plus en plus à faire choisir cette matière pour la construction d'ouvrages entiers de natures les plus variées.

Principalement en Angleterre, on l'emploie sur une grande échelle dans la plupart des ouvrages maritimes, tels que radiers, écluses, formes de radoub, tourelles-balises, phares, murs de quai, jetées, digues, brise-lames, et on peut dire que certains ports sont construits à peu près exclusivement en béton. Cette pratique est surtout très économique. Il convient toutefois de conserver l'usage de la pierre dure dans certaines parties soumises à de grandes fatigues ou à l'usure, telles que les angles, les arêtes et les couronnements.

Une autre application non moins importante du béton est la construction de conduits continus et sans joints, tels qu'égouts, aqueducs, ponts-canaux, déversoirs, siphons, conduites forcées, canalisations électriques, tubages de puits, cuvelages de mines, tunnels, voûtes et poternes. Ces ouvrages joignent à leur étanchéité et à leur grande solidité, eu égard au cube des matières qui y entrent, l'avantage de

pouvoir être exécutés rapidement malgré le peu d'espace dont on dispose généralement en pareils cas pour l'établissement des chantiers.

Le béton se prête encore facilement à l'exécution de réservoirs, de barrages, de murs de clôture ou de soutènement, de ponts, de planchers, d'escaliers et même de maisons complètes, ces dernières, il est vrai, peu pratiques, à cause de la difficulté qu'on a à en modifier après coup la disposition.

Mais où son emploi paraît peut-être le plus indiqué, c'est quand il s'agit d'obtenir des masses à la fois inébranlables et de formes compliquées, comme dans les bâtis de machines et les ouvrages de fortification. Pour ces derniers notamment, on a reconnu, depuis une quinzaine d'années, qu'une épaisse carapace monolithe en béton semblait constituer la meilleure protection contre les projectiles chargés avec les explosifs modernes, et toutes les nations militaires se sont empressées de multiplier sur leurs territoires les ouvrages de défense de cette nature, ce qui a augmenté dans une proportion considérable la consommation du portland dans l'Europe continentale.

143. Avantages et inconvénients du béton. — Les appréciations suivantes sont empruntées à l'ouvrage déjà cité de M. Mahiels, dont elles forment la conclusion, et où le lecteur pourra trouver des détails spéciaux sur l'exécution des divers genres de travaux qui viennent d'être énumérés rapidement, ainsi que la description sommaire d'un certain nombre d'ouvrages particuliers :

« La fabrication du béton pouvant s'effectuer mécaniquement, par des moyens qui ont en outre l'avantage de la simplicité et de l'économie, il est loisible d'activer la marche des travaux.

La rapidité d'exécution est une source de grands bénéfices : elle réduit les frais généraux, les frais de surveillance, de personnel; elle assure un rendement supérieur de tout le matériel devenu plus souvent disponible ; elle donne au cons-

tructeur la faculté de se lancer dans des affaires nouvelles.

La rapidité d'exécution supprime beaucoup de fausses mains-d'œuvre et de pertes de temps. Ainsi, dans l'établissement d'un chemin de fer, les remblais, fréquemment arrêtés par la lenteur apportée à l'érection des ouvrages d'art, auront libre passage lorsque les fondations, les piles, les culées des grands ponts et des viaducs, les aqueducs, les ponceaux seront coulés en béton.

Il serait oiseux de prétendre récapituler les avantages attachés à une exécution rondement menée; l'ingénieur et l'entrepreneur savent bien les apprécier dans chaque cas spécial.

Le béton de ciment peut être mis en œuvre pendant la saison froide. Cette propriété devient capitale dans les contrées du Nord, en autorisant la poursuite de maçonneries dont l'achèvement remis à la campagne prochaine nuirait au développement des chantiers.

Dans les travaux hydrauliques, l'emploi du béton diminue la durée et par suite les frais d'épuisement; le coulage sous l'eau annule même ces dépenses.

Le monolithe comporte une double qualité en admettant dans sa composition des matériaux à bon marché et que presque partout on trouve en abondance. Les travaux de chemins de fer, de canaux, etc., utiliseront, avec bénéfice d'abord, les pierrailles souvent livrées à pied d'œuvre par l'avancement des remblais ou les graviers dragués dans un cours d'eau voisin; l'exécution, ensuite, ne sera pas subordonnée à l'arrivée de matériaux exploités ou confectionnés au loin et qu'il importe parfois d'amener, à grands frais, par des voies d'accès difficile, pouvant même temporairement devenir impraticables.

L'économie des petits matériaux doit encore être envisagée sous une autre face. Les déchets sont nuls: tout passe dans le béton. Les gros matériaux se détériorent, se brisent, subissent des retailles qui produisent des déchets encombrant le chantier ; ils sont enfin de maniement moins facile.

Les diverses mains-d'œuvre, même quand toutes les opé-

rations se font à la main, ne demandent aucun apprentissage. La fabrication complète se passe du concours du maçon : cet avantage doit être d'autant plus pris en considération que les salaires des artisans spéciaux s'élèvent incessamment.

Il est sage aussi de ne pas perdre de vue que, dans les pays lointains, le recrutement d'un nombre même limité de maçons est problématique, sinon impossible.

La suppression des spécialités contrarie les chances de grève, élément qui, de nos jours, intervient dans toutes les estimations.

On analyse bien l'économie du béton, en observant que l'ouvrier ne manipule pas les matériaux, au sens littéral du mot. Les opérations se résument par de véritables mains-d'œuvre de terrassement, tandis que, dans les autres systèmes de maçonnerie, l'homme doit prendre en main chaque élément, placer le mortier, caler, araser, etc.

Le monolithe ne connaît pas les complications de l'appareil qui absorbent du temps et de l'argent. Il en est de même de la sujétion des parements qui sont obtenus, sans dépenses, par le pilonnage de la masse dans l'encoffrement.

Les procédés habituels exigent, en général, dans l'exécution des ouvrages d'art, la présence d'un puissant matériel de manœuvre, de machines, de grues, de lourds ponts de service, alors que la mise en œuvre du béton se fait au moyen de wagonnets et de voies légères.

Au point de vue technique, le béton présente également de sérieux avantages.

Il permet, en variant la richesse en agglomérant, de garantir l'imperméabilité et d'élever des massifs offrant, sous des épaisseurs réduites, toutes les résistances de sécurité.

Par sa nature même, le béton, formant monolithe, répartit avec uniformité les pressions, écarte le danger des tassements inégaux et résiste comme un seul bloc au glissement ainsi qu'au pirouettement sur les arêtes.

Sa plasticité, au moment de la mise en œuvre, lui réserve le pouvoir d'épouser tous les profils et de revendiquer la qualité de constituer, dans les vides, le bourrage le plus énergique.

Le coulage sous l'eau facilite une exécution que, dans certaines circonstances, les autres méthodes ne conduisent à bonne fin qu'au prix des plus grands sacrifices.

Enfin le béton comporte, sans parler de son emploi dans les fortifications, des ressources dont le détail serait fastidieux et futile, chaque application particulière suffisant à les mettre en lumière.

D'un autre côté, il ne faut pas voir dans le monolithe la solution universelle en matière de maçonnerie, car le béton n'est pas exempt de défauts.

Il est peu décoratif.

En élévation, il nécessite l'établissement de coffrages.

Son emploi dans les arches de grande portée impose une vigilance minutieuse et sans cesse tenue en éveil. C'est, en effet, à une surveillance, un instant peut-être relâchée, qu'il y a lieu d'attribuer les échecs, les insuccès subis par une façon maladroite : quelques mélanges mal soignés suffisent pour compromettre la stabilité d'une voûte.

Le béton est sujet à des fendillements et à des fissures qu'une fabrication bien entendue sait pourtant corriger et ramener à un minimum tel que ces détériorations ne peuvent plus être taxées d'inconvénient.

Enfin, il est incontestable, en soupesant et le pour et le contre, que le béton, grâce à l'économie de son prix de revient, doit primer tous les autres modes de maçonnerie dans l'érection des ouvrages d'art (abstraction faite des grandes voûtes), dans la construction des gros massifs et dans l'établissement de *toutes* les fondations. »

§ 3. — Ciment armé [1]

144. Principe. — La faiblesse des résistances trouvées pour les mortiers et bétons de ciment dans les essais de

[1] L'état actuel de cette question a été exposé par M. le capitaine Ch. Boitel. dans un intéressant article de 78 pages, publié par la *Revue du Génie militaire* (1896).

traction relativement à celles qu'ils manifestent dans ceux de compression restreint l'emploi de ces matériaux aux seules applications dans lesquelles ils ont surtout à subir des efforts de compression, mais où n'entrent en jeu que des tensions insignifiantes.

Le fer ou l'acier, au contraire, peuvent supporter sans se rompre des tensions considérables, en moyenne 3.500 kilogrammes par centimètre carré. Si donc on associe l'un de ces métaux au ciment en disposant les deux matières de telle sorte que la première ait à lutter surtout contre les efforts de traction et la seconde contre ceux de compression, on réalisera un ensemble particulièrement résistant, qui devra se prêter avantageusement à de nouvelles applications.

Tel est le principe fondamental du ciment armé ou, pour employer une expression plus précise que celle qui sert de titre à ce paragraphe et qu'on emploie plus fréquemment à cause de sa forme concise, des ouvrages en mortier (ou en béton) avec ossature métallique.

Pourtant, il ne faudrait pas croire qu'un pareil raisonnement ait servi nécessairement de point de départ pour les premiers travaux exécutés d'après ce système. Dès longtemps on a songé à noyer des tiges de fer dans les mortiers, de manière à en augmenter la résistance tout en réduisant les épaisseurs. Mais c'est seulement depuis quelques années que cette pratique s'est généralisée et a acquis la sanction d'une expérience journalière et variée.

Employé depuis très longtemps par les maîtres de forges, puis préconisé par F. Coignet en 1861, le béton armé fut appliqué en France par M. Monier, à la construction de menus ouvrages de jardins, tels que réservoirs, bassins, tuyaux, etc. En 1880, les brevets Monier furent achetés par une société qui, en Allemagne et surtout en Autriche-Hongrie, donna une grande extension à leurs applications, construisit de nombreux et importants ouvrages et procéda à un certain nombre d'expériences destinées à faire ressortir les avantages du système [1].

[1] Voir Rehbein : *Ausgewählte Monier-und Beton-Bauwerke*, Berlin, 1894.

Depuis lors, d'autres procédés se sont développés un peu partout et ont reçu des applications importantes, et, tout récemment encore, une nouvelle société s'est fondée en France pour le développement et l'entreprise des constructions en ciment armé [1].

145. Principaux systèmes. — Bien qu'on emploie des ossatures métalliques à des travaux de natures les plus diverses, chaque constructeur spécialiste ne se départit généralement guère du système qui lui est propre, dont le principe se retrouve dans les différents types d'ouvrages, avec seulement quelques modifications de détail.

Comme, presque toujours, les constructions dont il s'agit peuvent être décomposées en éléments soumis à des efforts de flexion, c'est surtout dans la constitution des poutres et des dalles de portées plus ou moins étendues qu'on trouve le plus nettement accusés les caractères distinctifs des divers systèmes.

« Ces dalles, écrit le capitaine Boitel, sont composées d'une couche de mortier de ciment d'épaisseur variable, mais toujours assez faible, englobant une ossature métallique placée généralement à leur partie inférieure.

Dans le système Monier, l'ossature se compose (*fig.* 104) de barreaux de fer rond *a*, *a*, distants de $0^m,05$ à $0^m,10$ d'axe en axe et d'une section variable avec la charge à supporter, au-dessus desquels sont placés d'autres barreaux *b* de 3 à 6 millimètres de diamètre et à la même distance les uns des autres. Les deux systèmes de barreaux sont reliés en un certain nombre de leurs points de croisement par des attaches de treillageur en fil de fer de 1 millimètre environ de diamètre.

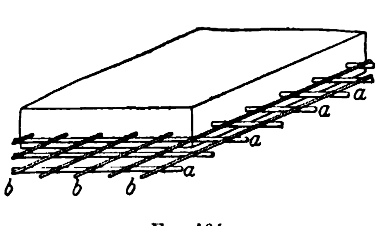


Fig. 104.

[1] Voir la collection du journal *Le Ciment*, organe officiel de la Chambre syndicale des Fabricants de Ciment portland de France.

Les barreaux inférieurs *a*, qui ont à supporter l'effort exercé sur la dalle, reçoivent le nom de *tiges de résistance*, les barreaux supérieurs *b*, qui sont seulement destinés à répartir les charges, sont appelés *tiges de répartition*.

Quand les charges à supporter sont très considérables, l'ossature comprend plusieurs systèmes de tiges constitués comme celui qui vient d'être décrit, et qui peuvent être reliés entre eux.........

En Amérique, on a employé des ossatures formées de lames verticales percées de trous (*fig*. 105); dans ces trous étaient enfilés des fers ronds ayant pour but d'empêcher les lames de glisser dans le mortier.

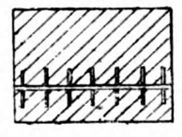


Fig. 105.

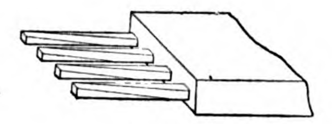


Fig. 106.

On a fait usage également de barreaux de fer carré, sans aucune liaison entre eux, mais tordus de façon à empêcher leur glissement (*fig*. 106)[1].

M. Cottancin constitue l'ossature par le tissage d'une trame et d'une chaîne au moyen d'un brin continu de métal formant des boucles aux extrémités de la dalle (*fig*. 107). Les éléments des mailles peuvent se rapprocher ou s'éloigner suivant que la charge à supporter est plus ou moins considérable, mais la section du fer employé ne varie pas, c'est toujours du fer rond de $4^{mm},5$ environ, fer employé comme matière première pour la tréfilerie. Quand, pour obtenir la

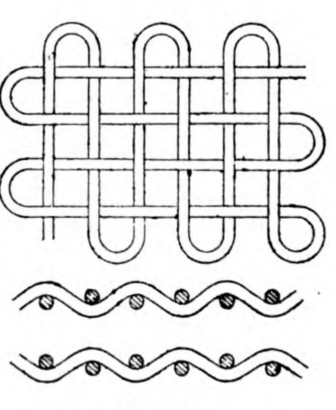


Fig. 107.

[1] M. Monier fils emploie également des barreaux tordus.

résistance voulue, on est amené à employer un treillis trop serré pour laisser passage au mortier, on le remplace par un treillis plus large en incorporant de distance en distance dans le tissage des barreaux de plus grande section. On peut aussi augmenter la résistance des dalles en les munissant de nervures, dites épines-contreforts.........

Dans le système Bordenave, on trouve encore, comme dans le système Monier, deux séries de barreaux perpendiculaires les uns aux autres et reliés par des attaches, mais la section de ces barreaux, au lieu d'être circulaire ou carrée, est en forme de L, de U et surtout de I (*fig.* 108). Leur épaisseur n'est que de $0^{mm},9$ à $1^{mm},4$: le laminage de

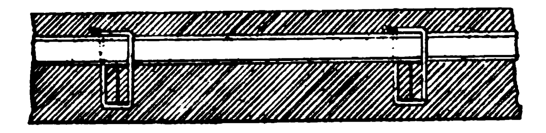


Fig. 108.

barres aussi minces présentant d'assez sérieuses difficultés, M. Bordenave a remplacé le fer par l'acier, dont la résistance est plus grande. »

M. Matrai noie dans le mortier ou dans toute autre matière formant empâtement, des séries croisées de fils métalliques plus ou moins gros suspendus en forme de chaînettes.

Les voûtes d'après le système Melan sont basées sur l'emploi de poutrelles en I disposées parallèlement à des distances convenables, cintrées suivant la forme de la voûte, noyées dans le béton et s'arc-boutant contre les solives du plancher.

Dans divers cas, on s'est encore servi d'armatures en tôle ondulée ou en toiles métalliques à mailles plus ou moins larges.

M. Hennebique forme des poutrelles en simple T à très large bourrelet (*fig.* 109) présentant, à leur partie inférieure, une ou plusieurs barres rondes en acier noyées dans le mortier et reliées au réseau de la dalle proprement dite par

des étriers en fer feuillard. Quelquefois d'autres barres plus faibles sont noyées à la partie supérieure de chaque poutre.

Quel que soit le système d'ossature adopté, le mortier doit être suffisamment gras pour bien adhérer au fer. Les qualités dont il doit faire preuve sont d'ailleurs les mêmes que lorsqu'il est employé seul, de même que les principes à observer relativement à son dosage et à sa fabrication. La grosseur maximum des grains de sable varie suivant la nature de l'ouvrage ; dans certains cas, on fait même usage de béton. Toutes les fois qu'on peut le faire commodément, il est avantageux de pilonner le mortier, qui alors ne doit pas être trop fortement mouillé ; mais cette opération est souvent rendue assez difficile par la présence de l'ossature. Un ciment lent s'impose presque toujours.

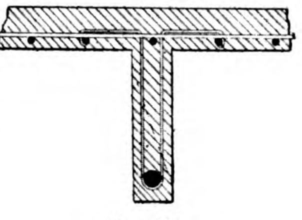


Fig. 109.

146. Applications diverses. — La plupart des types qui viennent d'être définis s'appliquent plus spécialement à la construction de dalles planes.

Pour les planchers et les terrasses, on peut recourir aux mêmes moyens. Toutefois, quand la portée dépasse certaines limites, on pourrait être entraîné à de trop fortes épaisseurs ; il est alors préférable soit de recourir à une arche fortement surbaissée, que l'on établit en ciment armé d'après les mêmes principes, soit de diviser la portée au moyen de poutres, qui peuvent d'ailleurs être parallèles entre elles ou se croiser en formant des figures quelconques, et sur lesquelles reposent une dalle continue ou des voûtelettes en ciment armé. Ces poutres sont généralement formées elles-mêmes d'armatures métalliques noyées dans du mortier et rendues, par exemple comme dans la figure 109, solidaires du plancher proprement dit. Tantôt on les laisse apparentes, tantôt on les masque par un plafond appliqué après coup. Suivant les cas, on peut introduire soit dans les tympans

des voûtelettes, soit entre le plafond et le plancher, différentes matières légères destinées à diminuer la sonorité ; enfin, le plancher est généralemeut recouvert d'un enduit, d'un parquet, etc.

L'emploi du ciment armé en architecture ne se borne pas aux planchers ; on l'applique également à l'exécution de cloisons, de murs, de combles, de coupoles, de flèches, etc., et il existe des édifices construits à peu près complètement d'après ce principe (Lycée Victor-Hugo à Paris, nouveau casino de Biarritz, etc.).

Dans les fondations sur terrains mouvants, il est avantageux de noyer dans le béton des fers profilés de fort calibre, qui donnent de la rigidité à sa masse et permettent d'en réduire le volume, ce qui diminue en même temps l'importance des terrassements. C'est ainsi notamment que sont fondées les maisons géantes de Chicago.

Les ossatures métalliques permettent de réduire considérablement l'épaisseur des parois des réservoirs et des tuyaux de tous diamètres. On en a fait de nombreuses applications pour l'établissement de canalisations d'eaux ou d'égouts, dont quelques-unes très importantes, comme, par exemple, le réseau de distribution des eaux de la plaine d'Achères, exécuté tout récemment pour la Ville de Paris (système Bonna).

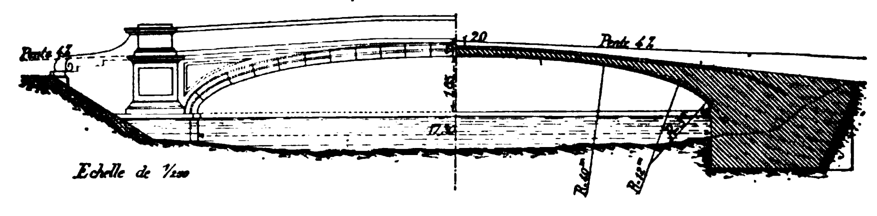


Fig. 110 [1].

On construit d'après les mêmes principes des passerelles et des ponts soit pour routes, soit même pour chemins de fer, avec une flèche faible et une épaisseur extrêmement réduite

[1] L'épaisseur du béton à la clef, difficile à lire sur la figure, est de 0m,35, et celle du ballastage ajouté par dessus est de 0m,20.

qui leur donne un aspect de grande légèreté ; la plus grande partie de la masse du béton se trouve reportée dans les culées, qui ont alors à résister à des poussées considérables. En pareil cas, en effet, les fers parallèles à l'intrados ne doivent plus être soumis à des efforts de traction, mais subissent plutôt des compressions longitudinales, et le mortier qui les enveloppe sert surtout à les empêcher de se gondoler, en s'opposant au *flambement*. La figure 110 représente un pont pour route construit d'après le système Monier.

Enfin, les ossatures sont encore employées avantageusement pour l'établissement de conduits souterrains tels que voûtes et poternes, dont elles permettent de réduire la hauteur par l'emploi de formes surbaissées. A ce point de vue, elles doivent être d'un puissant secours dans les ouvrages de fortification, en même temps qu'elles communiquent aux massifs un important surcroît de résistance et de solidarité.

147. Essais. — D'assez nombreux essais ont été faits soit sur des ouvrages réels en ciment armé (ponts, voûtes, planchers, etc.), pour éprouver leur résistance ou leur élasticité, soit sur des pièces d'essai, le plus souvent en forme d'arches, de poutres ou de dalles, construites spécialement en vue des expériences.

Dans le premier cas, on s'est généralement contenté de mesurer les flèches élastiques ou permanentes prises sous des charges données fixes ou mobiles ; dans le second, on a fait croître la charge progressivement jusqu'à la rupture, avec ou sans temps d'arrêt ou déchargements intermédiaires, en observant l'apparition des premières fissures ainsi que, dans plusieurs cas, les flèches au centre ou même en divers points de la portée. Parfois on a procédé parallèlement à des expériences directes d'élasticité, de déformation ou de rupture sur les éléments séparés du ciment armé.

Tantôt la charge a été uniformément répartie ; tantôt elle a été concentrée sur une portion plus ou moins réduite de la portée, symétriquement par rapport au milieu de cette dernière ; tantôt enfin, principalement dans le cas d'arcs et de voûtes, on a chargé seulement une des deux moitiés de

la pièce essayée, de manière à produire des efforts dyssymétriques.

Malheureusement, toutes ces expériences ont été généralement faites sur des assemblages trop complexes pour qu'on ait pu en déduire d'une manière bien certaine l'influence de chacune des dispositions adoptées pour ces constructions. La plupart des renseignements obtenus s'appliquent à des ouvrages isolés, sans qu'on soit en mesure d'en tirer d'indications sur la manière dont se seraient comportés d'autres ouvrages établis d'après des données un peu différentes, et, si quelques séries d'essais comparatifs ont bien été tentées, il ne paraît en être ressorti jusqu'à présent aucune loi bien nette.

On peut néanmoins en tirer les deux conclusions générales suivantes :

1° L'introduction judicieuse du fer ou de l'acier augmente considérablement la résistance et l'élasticité du mortier ;

2° La rupture, au lieu d'arriver brusquement, comme dans les ouvrages en mortier ou béton non armé, se produit progressivement après une déformation lentement croissante, souvent même pour une charge notablement supérieure à celle qui correspond aux premières fissures, et sans que la formation de ces dernières se traduise par une augmentation brusque de la flèche.

Il est inutile d'insister sur l'importance qu'ont ces observations au point de vue de la sécurité des travaux.

Parmi les expériences comparatives auxquelles ont été soumis des ouvrages en ciment armé, une série mérite une mention particulière, tant par le nombre et la portée des pièces essayées que par le soin apporté à leur construction, à l'observation des déformations et à l'interprétation des résultats. Entreprises sous les auspices de l'*Association des Ingénieurs et Architectes autrichiens*, ces expériences, qui n'ont pas coûté moins de 84.000 francs, ont porté sur des voûtes de dimensions variées formées de divers matériaux. Les plus importantes ont été exécutées à Purkersdorf sur quatre voûtes de 23 mètres de portée construites respecti-



vement en maçonnerie de moellons, en maçonnerie de briques, en béton et en ciment armé (système Monier), et sur un arc métallique avec articulations aux naissances, ayant aussi 23 mètres d'ouverture, en fer fondu Martin (doux). L'épreuve a été faite en chargeant jusqu'à rupture ces voûtes et cet arc d'un seul côté, entre une des culées et la clef.

Le tableau ci-contre indique les données essentielles et les principaux résultats obtenus.

Une des conclusions les plus intéressantes déduites des nombreux calculs auxquels les chiffres trouvés ont donné lieu, est que les voûtes essayées, et en particulier celle en ciment armé, se sont généralement comportées comme des arcs élastiques homogènes, de sorte qu'il conviendrait d'appliquer aux voûtes de même forme et de même construction les calculs des arcs métalliques sans articulation[1].

148. Théories et calculs. — Bien des techniciens ont déjà cherché à mettre en évidence la loi suivant laquelle les efforts se répartissent dans les ensembles hétérogènes formés par la réunion du mortier et du métal, de manière à pouvoir déterminer par le calcul les éléments d'une construction en fonction des charges qu'elle est appelée à supporter.

Nous nous bornerons à citer les noms de MM. Kœnen, Cottancin, Neumann, E. Coignet, de Tedesco, Planat, Melan, Grut, von Thullie, Mandl, et cette liste est certainement fort incomplète.

Aucun n'est encore arrivé à établir une théorie qui concorde exactement avec les résultats des expériences, et on a dû toujours se contenter d'hypothèses plus ou moins approchées.

Dans un travail très étudié[2], M. Planat a passé en revue les principales hypothèses qu'on peut admettre, savoir :

[1] Ces expériences ont été décrites dans : *Wochenschrift des œsterreichischen Ingenieur-und Architekten Vereins* (Vienne, 1895) et résumées en français dans *le Génie civil* (1895-1896), ainsi que dans une série d'articles de la *Revue Technique* (1895-1896), qui ont été réunis ensuite en un volume séparé : *Essais comparatifs de voûtes en matériaux divers ;* Juven, éditeur. Paris, 1896.

[2] *Recherches sur la théorie des ciments armés;* Paris, 1894.



1° Solidarité complète du fer et du ciment, les deux matières s'allongeant également dans le voisinage de leur surface de contact;

2° Expansion du ciment pendant la prise, produisant, avant l'action d'aucun effort extérieur sur la pièce armée, une traction du fer et une compression des parties du mortier avoisinantes;

3° Résistance du mortier à la traction considérée comme négligeable et fer se comportant comme un tirant encastré à ses deux bouts;

4° Fer considéré, en raison de la courbure qu'il prend par suite de la flexion de la dalle, comme soutenant la masse supérieure de mortier à la manière d'un câble tendu.

En comparant les conclusions mathématiques de ces diverses hypothèses à des résultats expérimentaux connus, il a constaté qu'aucune n'était complètement justifiée et conclu que, dans le courant d'un même essai, les conditions de travail du fer et du mortier doivent varier à mesure qu'on fait croître la charge fléchissante, en sorte qu'on doit se trouver successivement dans le cas de la première, de la troisième, puis de la quatrième hypothèse.

Néanmoins, M. Planat semble avoir une certaine préférence pour la troisième.

Il est probable qu'en réalité, alors même qu'on connaîtrait exactement, à chaque instant d'un essai, la nature des actions réciproques des deux matériaux en présence, les grandeurs de ces actions échapperaient à toute évaluation rigoureuse, par suite de l'incertitude des formules de la *Résistance des matériaux* dès que les limites d'élasticité sont dépassées, comme c'est le cas dans la grande majorité des expériences. Par contre, si l'on veut se borner au calcul des ouvrages de la pratique, qui doivent être établis de manière à toujours rester en-dessous de ces limites pour les plus fortes charges prévues, la difficulté de trouver la formule exacte de leur travail doit être bien moindre.

En l'absence de toute théorie solidement assise, les différents constructeurs spécialistes ont adopté des formules mi-théoriques, mi-empiriques, pour le calcul pratique des élé-

ments de leurs travaux. Comme, en général, ils admettent des coefficients de sécurité assez élevés, il est extrêmement rare qu'on constate à l'emploi qu'un ouvrage ait des dimensions insuffisantes.

Néanmoins, tant que les ingénieurs ne pourront pas justifier ou vérifier les projets par des formules établies de manière à inspirer une entière confiance, le ciment armé aura de la peine à se substituer complètement, malgré ses avantages réels, aux anciens modes de construction consacrés par des siècles de pratique.

149. Avantages et inconvénients du ciment armé. — L'une des causes essentielles de la résistance et de la durée des constructions en ciment armé est la forte adhérence du ciment contre le fer (v. art. 54). Aussi importe-t-il d'employer toujours, au moins dans le voisinage des armatures, des mortiers suffisamment riches pour que celles-ci se trouvent complètement entourées de ciment, et en particulier, d'éviter la présence, dans cette région, de bétons maigres qui n'auraient avec le fer que relativement peu de points de contact.

De même, l'égalité des dilatations thermiques du fer et du mortier, constatée notamment par M. Durand-Claye, assure une adhérence constante entre ces deux éléments, en dépit des variations de température.

Une autre cause d'augmentation de résistance et de sécurité est la solidarité que la présence du fer assure à toute la masse d'un même ouvrage. On peut même, principalement avec le système Cottancin, relier entre elles par un treillis continu les différentes parties d'une construction en ciment armé, murs, cloisons, planchers, couverture, de telle sorte que chacune supporte sa part des efforts appliqués directement à l'une d'elles. Un pareil entretoisement permet, dans certains cas, d'économiser sur les fondations, assure les toitures contre l'action des vents violents et obvie, dans une certaine mesure, aux dislocations pouvant provenir d'affaissements du sol ou de tremblements de terre. Mais il a aussi sa contre-partie dans la difficulté qu'on éprouve

à modifier après coup la disposition de la construction.

L'augmentation importante de résistance due à ces diverses causes, grâce à laquelle le ciment armé peut supporter des efforts de traction bien supérieurs à ceux qui rompraient les mortiers ordinaires ou les pierres, tout en présentant une plus grande rigidité que des pièces équivalentes exclusivement métalliques, permet, dans tous les cas usuels où une résistance considérable n'est pas nécessaire, de réduire notablement les dimensions des différentes parties d'une construction. Il en résulte un gain d'espace utile, une diminution du cube des terrassements à faire et des matériaux à approvisionner, une plus grande légèreté des constructions, avantages qui entraînent presque toujours eux-mêmes une diminution de la dépense, tant pour l'acquisition des matériaux que pour leur mise en œuvre.

Toutefois, la réduction des épaisseurs et la présence du fer donnent aux dalles armées une certaine élasticité qui, peut-être, pourrait à la longue devenir une cause de désagrégation sous l'effet de vibrations multipliées.

En outre, on a vu dans l'article précédent qu'aucune règle rigoureuse n'indiquait, dans chaque cas particulier, des dimensions et des dosages qu'on pût adopter en toute sécurité et sans dépenses superflues.

La facilité avec laquelle l'armature métallique se prête à toutes les formes permet d'obtenir des surfaces souvent assez compliquées sans empâtements exagérés. En particulier, dans les salles d'opérations, chambres d'hôpitaux, magasins à denrées, etc., il est facile d'arrondir tous les angles par des parties cylindriques lisses à grand rayon, ce qui simplifie le nettoyage et évite l'accumulation des poussières et des germes nuisibles.

Le réseau métallique n'augmente pas par lui-même l'imperméabilité des mortiers. Toutefois, noyé dans les enduits appliqués sur la face la plus accessible des murs, qui en général est opposée à celle contre laquelle l'eau exerce directement sa pression, il donne le moyen d'ancrer solidement ces enduits au reste de la maçonnerie et assure par là leur adhérence.

Le ciment étant un des matériaux qui résistent le mieux au feu et étant en même temps mauvais conducteur de la chaleur, l'armature métallique qu'il enveloppe n'atteint pas, dans les incendies, des températures trop élevées ni des dilatations exagérées; diverses expériences ont d'ailleurs montré que, soumises à des feux violents, des dalles de ciment armé ne subissent que des altérations insignifiantes. Au contraire, les solives en fer ou en acier sans enduit s'échauffent rapidement en se dilatant et poussant au vide les murailles contre lesquelles elles portent, puis perdent bientôt toute résistance et entraînent les planchers dans leur chute. Aussi tend-on de plus en plus à substituer le ciment armé au fer, notamment dans les maisons géantes des États-Unis, et construit-on, d'après le même système, des coffres-forts à l'épreuve du feu.

Enfin, le ciment armé paraît mieux résister aux intempéries que la plupart des autres matériaux tels que le fer, qui est sujet à la rouille, et le bois, qui est inflammable, putrescible et attaquable par les animaux rongeurs. Du reste, on préserve souvent maintenant ces substances par des enduits de mortier qui, au contraire, vont en durcissant continuellement avec le temps.

Comme on le voit, la méthode qui consiste à renforcer les mortiers par des armatures métalliques noyées dans leur épaisseur ne présente, à côté d'avantages variés, que des inconvénients assez légers, dont le principal est l'absence actuelle de formules rigoureuses. Il convient toutefois d'ajouter qu'elle est souvent d'une application assez délicate et exige, pour que les ouvrages offrent toutes les garanties de qualité qu'on est en droit d'en attendre, le concours d'ouvriers spéciaux et exercés. La préparation de l'ossature, sa mise en place et son arrimage aux pièces destinées à la supporter, de même que le bourrage convenable du mortier à travers le réseau de fer contre lequel il doit être exactement appliqué sans le déformer, demandent en effet des soins particuliers qu'on ne peut attendre de serruriers ou de maçons ordinaires. De même, les réparations devront être difficiles.

Enfin, il est évident que le mortier ou le béton doit être dosé judicieusement suivant la nature du travail et la qualité des matériaux dont on dispose.

Ces réserves faites, nous croyons que le ciment armé est appelé à un grand avenir et que la multiplication de ses emplois ne pourra que donner un nouvel essor à l'industrie des liants hydrauliques, tout en augmentant encore l'intérêt qui s'attache à l'étude de ces produits.

Comparaison de divers

ESSAIS

NATURE DU LIANT [1]	NUMÉRO D'ORDRE	POIDS SPÉCIFIQUE	COMPOSITION CHIMIQUE						
			Silice	Alumine	Sesquioxyde de fer	Chaux	Magnésie	Acide sulfurique	Perte au feu
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
			p. 100	p. 100	p. 100	p. 100	p. 100	p. 100	p. 100
	404	2,76	23,9	7,0	2,2	50,5	1,2	0,9	13.7
	401	2,92	27.6	4,7	1.7	57.0	0.3	1,1	7.9
Chaux hydrauliques	495	2,70	18.0	3,6	1,9	59,9	1,0	0,9	15,0
	408	2,84	22,8	2,1	0.6	63,9	1,2	0,5	8,9
	409	2,82	20,6	2.8	0,7	63,5	2,7	0.4	8,8
Ciment de grappiers	407	3,04	27,7	3,7	1,4	60,7	1,0	0,8	4,7
	399	3,15	23,2	9,2	5.2	53,7	1,2	0,6	5,7
	438	3,16	26,1	10,0	3,9	52,9	1,9	1,3	3,9
Ciments à prise rapide	460	3,06	23,0	8.9	4.0	49,4	1,3	3,4	10,0
	459	3,10	22,9	9,4	4,3	51.6	1,3	3,5	6.9
	456	3,21	20,9	9.1	3,2	55,9	4,0	2,8	4.1
Ciments naturels demi-lents	412	2,98	27.5	10,4	3,8	43,1	2.8	2,3	10,4
	455	3,20	22,0	9,5	3,4	56,2	4,0	2,8	2.1
	413	3.19	22.6	9,1	3,5	55,2	3,4	3,0	3.9
Ciments naturels à prise lente	489	3,15	22,6	8.8	4,0 [2]	52,9	1,6	2,8	6,1
et ciments mixtes propre-	402	3,00	23,1	11,4	2,5	54,2	1,8	2,1	3,0
ment dits.	403	3,20	22,5	7.8	3.5	59,6	1,4	3,1	3,1
	454	3,10	23,2	7,0	3,0	56,9	3,1	1,9	4.9
	410	3,05	21,5	8,5	2,6	60,0	1.9	2,6	3,1
	458	3.14	23.1	7,5	2.3	63,0	2.1	0,5	1,5
	431	3,17	23,1	7.3	2,4	64,1	0,4	0,8	1,9
Ciments portland	415	3.11	26,0	5,7	2,9	62,4	1,2	0,4	2.1
	476	3,10	25,3	5,8	2,2	62.7	0,7	1,0	2.8
	480	3.20	23,0	7,3	2,0	65,4	1.0	0,6	1,5
Id. (2e qualité)	422	3.12	26,8	11.5	2,0	55,3	1,0	0,4	3.0
Ciment-pouzzolane	411	2,89	22.6	8,1	1,9	58,5	1,6	0,8	6.4
	400	2,73	23,0	16,3	1,1	48,3	1.3	0.8	9,4
	482	2,80	23,8	13,6	0,9	51,5	3,6	0,2	6.0
Ciments de laitier	396	2,79	26,7	13.5	1,1	49,7	1,8	0,5	6.7
	481	2,80	26,6	13.0	1,0	50,5	1,9	0,3	6,4
	484	2,87	30,9	9,8	2,2	50,3	2,2	0,2	4,3

1 Indications basées sur le mode de fabrication ou, quand il était mal connu, sur la déclaration du fabricant, mais non sur les propriétés observées. La plupart des échantillons ont été envoyés, sur notre demande, par le fabricant, sachant qu'ils allaient être soumis à des expériences de laboratoire. Les échantillons nos 454, 455 et 456

liants hydrauliques.

DIVERS.

FINESSE			ESSAIS DE MORTIERS PLASTIQUES A DIVERS DOSAGES FAITS AVEC DIFFÉRENTS SABLES : CONSTANTES DES FORMULES PERMETTANT DE CALCULER :						
RÉSIDU TOTAL SUR LE TAMIS DE		Poussière entraînée par un courant ascendant de 10 cm. par minute	L'EAU RETENUE APRÈS SÉCHAGE PROLONGÉ			LA RÉSISTANCE A LA COMPRESSION PAR CM^2 APRÈS EXPOSITION DE 9 MOIS A L'AIR, PUIS 3 MOIS DANS L'EAU DE MER			
						Formule $P = H\left(\frac{c}{e+v}\right)^m$		Formule $P = K\left(\frac{c}{1-s}\right)^2$	
900 mailles	4 900 mailles		λ	α	α′	H	m	K	
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
p. 100	p. 100	p. 100		p. 100					moyenne
21	32	53,0	0,84	29,8	0,82	180	1,09	800	
14	24	61,6	0,76	24,6	0,72	190	1,30	740	
16	28	59,0	0,91	34,1	0,92	150	1,17	600	804
7	22	57,2	0,79	29,9	0,85	290	1,60	900	
4	13	65,1	0,74	30,5	0,86	280	1,46	980	
0	5	65,0	0,68	26,0	0,79	630	1,47	2190	2190
19	34	54,0	0,62	34,6	1,09	455	1,68	1460	
21	34	55.3	0,62	30,4	0,96	340	1.42	1240	
15	32	58.1	0,42	39,9	1,22	550	1,79	1430	1424
13	29	63.6	0,46	37,4	1,16	560	1,76	1530	
8	23	62,2	0,41	26,8	0,86	410	1,37	1460	
17	30	52,5	0,86	23.8	0,71	345	1.83	1040	1220
10	34	49,5	0,52	23,7	0,76	345	1,02	1400	
5	22	47.2	0.62	20,7	0,66	400	1,22	1540	
4,5	18,5	62,1	0.58	29,5	0.93	390	1,44	1400	
0	16	62,7	0,54	27,3	0,82	380	1,36	1500	1520
12	27	52.1	0.63	22,5	0,72	465	1,35	1780	
3	24	52,6	0,48	19,4	0,60	330	1,18	1380	
4	28	40.3	0,58	17,0	0,52	380	1,40	1540	
4	21	52.0	0,59	22,3	0,70	445	1,24	1770	
5	24	45.2	0,64	20,2	0,64	400	1,31	1540	1515
10	31	42.9	0,67	18,0	0,56	325	1,31	1280	
12	33	38.1	0.64	19.7	0,58	370	1,25	1430	
2,5	15,5	46.7	0,66	19,0	0.61	375	1,16	1530	
7	22	56,4	0,41	22,4	0,70	265	1,14	1130	1130
1	7	65,0	0.65	21,7	0.63	355	1,36	1380	1380
1,5	7	76,3	0,54	30,8	0,74	300	1,34	1200	
6	27	56,7	0,62	23,6	0.66	225	1,34	870	
4	11	53,0	0.69	27,6	0,77	335	1,50	1240	1030
2	8	62,0	0.79	23.9	0,67	230	1,43	840	
4	10	71,3	0,57	21.6	0,62	245	1,14	1000	

ont été conservés deux mois en barils fermés avant les essais.

[2] Ce ciment contient en outre 1,0 p. 100 d'oxyde de manganèse.

Comparaison de divers

ESSAIS SUR PATES PURES ET

NATURE DU LIANT [1]	NUMÉRO D'ORDRE	Proportion d'eau corresp' à la consistance normale	Rendement	PATES PURES A CONSISTANC… — VOLUMES ÉLÉMENTAIRES ET FONCTIONS DE CES VOLUMES ($s = o$): c	e	v	$\frac{c}{e+v}$	$\left(\frac{c}{1-s}\right)^2$	DÉBUT DE PRISE A L'AIGUILLE VICA… DE 300 GRAMMES[2] — Gâchage à l'eau: de mer	douce
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
		p.100							h. min.	h. min.
Chaux hydrauliques	404	39	0,781	0,465	0,505	0,030	0,870	0,216	9 30	4 30
	401	36	0,728	0,471	0,497	0,032	0,894	0,222	8 15	3 30
	495	44	0,850	0,437	0,518	0,045	0,777	0,191	9	7 30
	408	45	0,830	0,426	0,546	0,028	0,744	0,181	8 30	8 45
	409	45	0,828	0,427	0,546	0,027	0,746	0,182	5 30	8
Cim. de grappiers	407	30,5	0,664	0,496	0,462	0,042	0,988	0,246	4 30	4
Ciments à prise rapide	399	39	0,741	0,428	0,524	0,048	0.748	0,183	0 9	0 8
	438	29	0.634	0,499	0,456	0,045	0,997	0,249	0 8 1/2	0 6 1/2
	460	47,5	0,848	0,386	0,555	0,059	0.631	0,149	0 9	0 8
	459	45	0,812	0,398	0,554	0,048	0,662	0,158	0 8	0 5
	456	31	0,656	0,476	0,470	0,054	0,910	0,227	0 3 1/2	0 4 1/2
Ciments naturels demi-lents	412	32,5	0,688	0.488	0,472	0,040	0,952	0,238	1 15	1
	455	23	0,570	0,550	0,403	0,047	1,222	0.303	0 33	0 20
Ciments naturels à prise lente et ciments mixtes proprement dits	413	23,5	0,574	0,548	0,409	0,043	1,213	0,300	0 45	0 33
	489	30	0,650	0,490	0,462	0,048	0,963	0,240	5 45	3 30
	402	31	0,672	0,496	0,463	0,041	0,987	0,246	9	6
	403	25	0,588	0,531	0,424	0.045	1,132	0,282	4	3
	454	24	0,597	0,540	0,403	0,057	1,174	0,292	3 30	2 30
Ciments portland	410	22	0,578	0,569	0,382	0,049	1,320	0,324	6 15	6 45
	458	27,5	0.621	0,515	0,441	0,044	1,062	0,265	6 30	2 45
	431	24,5	0,594	0,531	0,415	0,054	1.132	0,282	3 30	0 20
	415	25	0,605	0,532	0,411	0,057	1,137	0,283	0 24	0 4
	476	23	0,588	0,551	0.391	0,058	1,227	0,304	4	4 30
	480	24	0.590	0,530	0,406	0,064	1.128	0,281	0 47	0 7
Id. (2e qualité)	422	27,5	0,622	0,514	0,432	0,054	1,058	0.264	0 10	» »
Cim.-pouzzolane	411	27	0,650	0,534	0,419	0,047	1,146	0,285	5	6
Ciments de laitier	400	31.5	0,710	0,516	0,444	0,040	1,066	0,266	4 10	3
	482	30	0,690	0,519	0,436	0,045	1,079	0,269	4 45	3 30
	396	25	0,638	0,564	0,390	0,046	1,294	0,318	6 15	6
	481	26,5	0.654	0.546	0,403	0,051	1,204	0,298	5	5
	484	27	0,654	0,535	0,411	0,054	1,151	0,286	3 15	3 15

[1] Voir le renvoi (1) du tableau I.
[2] Les fins de prise n'ont généralement pas été observées d'une manière bien exacte.

liants hydrauliques.

SUR MORTIERS NORMAUX.

NORMALE							Proportion d'eau employée pour le gâchage	MORTIERS NORMAUX BATTUS 1 : 3 AU SABLE QUARTZEUX MOULU 64 — 144						
RÉSISTANCE A LA TRACTION PAR CM² (MOYENNE DES 3 PLUS FORTES SUR 6 BRIQUETTES) GACHAGE ET IMMERSION A L'EAU DE MER 3								RÉSISTANCE A LA TRACTION PAR CM² (MOYENNE DES 3 PLUS FORTES SUR 6 BRIQUETTES) GACHAGE ET IMMERSION A L'EAU DE MER 3						
1 sem.	4 sem.	12 sem	26 sem.	1 an	2 ans	4 ans		1 sem.	4 sem.	12 sem.	26 sem.	1 an	2 ans	4 ans
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	p. 100	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.
»	12,0	»	»	20,0	»	»	12	»	11,3	»	»	25,0	»	»
»	6,3	»	»	27,0	»	»	11	»	7,7	»	»	26,5	»	»
2,8	4,6	12,8	»	19,7	»	»	14	2,6	4,5	13,7	»	19,0	»	»
»	15,0	»	»	29,7	»	»	13	»	10,0	»	»	23,8	»	»
»	12,0	»	»	25,3	»	»	13	»	11,8	»	»	24,0	»	»
»	40,2	»	»	50,1	»	»	10,5	»	21,2	»	»	33,3	»	»
19,7	29,2	37.2	29,0	23,5	22,2	25,2	13	6,1	12,8	23,7	32,3	32,3	29,2	34,5
»	20,5	»	»	36,7	»	»	12	»	9,9	»	»	26,7	»	»
18,3	28,7	27,0	»	15,2	»	»	14,5	11,5	20,8	27,2	»	29,3	»	»
»	25,3	»	»	13,5	»	»	14,5	»	14,5	»	»	27,3	»	»
23,2	32,5	28,8	35,5	35,5	22,7	13,5	11,5	13,0	28,7	32,8	32,0	29,2	31,3	31,5
7,5	8,1	13,0	14,3	22,8	33,2	32,8	11,5	4,0	6,0	11,7	18,2	25,8	33,8	32,8
28,0	48,7	36,5	28,3	12,7	10,2	8,4	10,5	12,7	24,7	30,7	34,0	38,3	36,8	41,0
24,0	37,3	49,7	45,8	61,2	56,0	58,7	10,5	13,2	24,8	33,3	46,3	40,5	41,3	40,7
28,3	30,7	41,7	»	32,8	»	»	10,5	13,0	20,0	32,3	»	42,5	»	»
»	31,3	»	»	14,0	»	»	11	»	22,5	»	»	34,2	»	»
24,0	35,0	38,3	38,5	25,8	36,7	34,5	11	7,0	14.0	23,2	31,7	33,2	37,2	38,7
22,7	37,0	41,2	45,0	41,3	51,2	58,7	10,5	5,9	13,5	21,7	32,0	33,8	33,7	34,8
36,2	51.3	52,7	18,0	11,8	76,7	8,5	10	9,8	15,2	19,2	25,8	24,3	27,8	29,8
»	47,0	»	»	12.6	»	»	10,5	»	16,2	»	»	27,8	»	»
40,3	58,7	57,7	»	66,2	»	»	10,5	13,7	19.5	23,5	»	28,5	»	»
37,5	47,5	54,0	»	17,5	»	»	10,5	12,8	16,5	22,7	»	21,7	»	»
39,5	50,5	51,2	18,3	15,2	53,5	36,5	10,5	12,0	13.5	17,5	23,2	26,0	29.3	32,7
38,2	53,2	60,7	»	19,5	»	»	10	15,7	20,3	24,7	»	26,2	»	»
18,0	29,3	26,3	»	13,3	»	»	11	7,5	13,3	22,0	»	30,8	»	»
23,7	41,2	43,3	13,5	10,7	16,5	9,5	10,5	9,5	19,5	24,5	23,2	24,2	31,0	29,7
										»				
»	43,0	»	»	13,2	»	»	10,5	»	27.5	»	»	31,3	»	»
»	26,7	»	»	12,5	»	»	11	»	12,7	»	»	24.3	»	»
»	45.8	»	»	11,5	»	»	10,5	»	27,5	»	»	32,8	»	»
»	35,8	»	»	22,8	»	»	11	»	13,8	»	»	25,3	»	»
26,8	32.5	42,0	39,2	38,7	38,5	38,2	10,5	14.2	22,8	32,3	35,0	40,3	41,5	42,3

3 Immersion après 7 jours pour les chaux hydrauliques et après 24 heures pour tous les autres produits.
Pour quelques échantillons, d'autres briquettes seront rompues après 6 ans.

Comparaison de di

ESSAIS SUR MORTIERS PLASTIQUES 1:3 A S

NATURE DU LIANT [1]	NUMÉRO D'ORDRE	PROPORTION D'EAU EMPLOYÉE POUR LE GACHAGE	FONCTIONS des VOLUMES ÉLÉMENTAIRES		MILIEU DE PRISE [2] — COTÉ ET POIDS DE LA TIGE D'ESSAI		RÉSIST. A LA COMPRESS. P (MOY. DE 2 CUBES) [3] — EAU DE MER		EAU DOUCE		
			$\frac{c}{e+v}$	$\left(\frac{c}{1-s}\right)^2$	10 mm. 1.000 g.	5 mm. 2.500 g.	12 sem.	1 an	12 sem.	1 an	12 sem.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		p. 100			h. min.	h. min.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.
Chaux hydrauliques	404	18	0,420	0,087	4 20	13 10	29	55	28	55	20
	401	17,5	0,400	0,081	5 30	17	21	76	19	63	17
	495	20	0,400	0,081	3 20	13 20	18	43	14	42	17
	408	19	0,385	0,077	3	11 30	»	»	»	»	»
	409	19	0,405	0,084	4	12	»	»	»	»	»
Ciment de grappiers	407	17	0,405	0,084	4 20	7 20	»	»	»	»	»
Ciments à prise rapide	399	19	0,355	0,069	1	1	33	65	30	68	38
	438	17	0,375	0,075	1	1	39	57	32	65	38
	460	21	0,350	0,068	0 40	0 50	34	51	40	69	46
	459	20	0,350	0,068	0 40	0 50	36	54	35	65	45
	456	17	0,375	0,075	1	1 10	65	132	61	112	82
Ciments naturels demi-lents	412	17,5	0,380	0,076	0 50	3	25	64	13	33	25
	455	16	0,380	0,076	2 30	4 40	48	78	58	103	72
Ciments naturels à prise lente et ciments mixtes proprement dits	413	16	0,395	0,081	2 50	4 40	69	110	41	110	65
	489	16	0,405	0,084	4	10	49	84	46	97	51
	402	17	0,400	0,081	7 30	17	58	92	65	98	74
	403	16	0,375	0,075	4 40	17	35	71	31	84	56
	454	15,5	0,395	0,081	2	8 50	43	97	41	95	44
Ciments portland	410	16	0,405	0,084	4 30	9	67	83	66	108	72
	458	17	0,380	0,076	5	11	58	77	64	109	56
	431	17	0,370	0,073	3 30	10 40	58	92	74	125	82
	415	17,5	0,370	0,073	2 20	8 30	51	66	59	87	58
	476	17	0,375	0,075	2	6 10	38	58	45	76	48
	480	17	0,370	0,073	2 15	8	54	72	80	105	76
id. (2[e] qualité)	422	17	0,380	0,076	0 45	1 20	39	73	43	84	40
Ciment-pouzzolane	411	16	0,460	0,099	4 30	7 40	80	115	83	107	88
Ciments de laitier	400	17	0,475	0,104	5 45	7 50	77	92	130	152	153
	482	17	0,425	0,089	3 40	8 50	42	58	44	60	41
	396	15	0,480	0,106	7 40	13 20	81	115	91	125	95
	481	15	0,455	0,099	4 30	8 30	51	72	55	73	48
	484	15	0,465	0,100	4	8 20	71	94	59	74	50

1 Voir le renvoi (1) du tableau I.
2 Époque où une tige carrée de côté et de poids donnés s'arrête à mi-épaisseur d'une rondelle de mort
0m,09 d'épaisseur (Gâchage à l'eau de mer).

…n de …ants hydrauliques

…ES …TUREL (SABLE P′ : $g = 0{,}10$; $m = 0{,}25$; $f = 0{,}65$).

RÉSISTANCE A LA TRACTION PAR CM² (MOYENNE DE 6 BRIQUETTES) 3

	GACHAGE ET IMMERSION A L'EAU DE MER					GACHAGE ET IMMERSION A L'EAU DOUCE						GACHAGE A L'EAU DOUCE EXPOSITION A L'AIR					
…n.	12 sem.	26 sem.	1 an	2 ans	4 ans	4 sem.	12 sem.	26 sem.	1 an	2 ans	4 ans	4 sem.	12 sem.	26 sem.	1 an	2 ans	4 ans
…4	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
…g.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.
…,9	13,8	15,9	15,5	18,8	18,3	4,7	9,2	10,9	12,7	16,4	18,6	6,1	12,3	14,1	14,4	17,6	20,5
…,1	10,2	14,3	17,5	21,5	22,2	4,5	7,0	9,4	16,2	18,8	20,3	6,3	11,0	10,6	10,9	15,4	15,2
…,5	4,7	6,9	10,3	12,6	14,5	2,0	5,4	8,5	13,5	13,4	16,8	1,9	4,9	8,5	11,3	11,8	12,4
…,6	12,6	15,5	16,6	16,9	18,8	3,6	8,4	11,5	15,7	16,6	19,4	4,1	7,7	11,6	10,6	13,8	13,5
…,6	12,9	16,5	18,7	20,6	19,7	4,8	7,6	12,9	19,4	20,4	19,3	6,1	9,9	12,1	17,4	15,8	14,4
…,2	19,9	21,4	22,3	25,7	26,1	11,0	18,4	17,4	22,9	25,9	28,7	12,1	18,7	20,2	21,5	26,5	27,5
…,4	13,7	17,8	21,6	25,6	25,3	4,8	8,0	11,8	15,7	18,0	19,3	6,3	11,7	11,4	14,6	13,8	18,2
…,2	13,8	18,2	21,8	27,3	27,9	4,4	9,1	13,0	16,9	20,2	22,8	7,2	11,8	13,1	13,2	18,3	23,1
…,0	15,3	17,9	14,8	20,6	18,8	6,4	10,4	13,8	14,8	18,9	18,8	8,3	11,8	15,0	13,3	18,3	15,1
…,4	13,5	17,3	18,9	20,7	21,6	5,8	8,1	12,0	15,1	15,8	18,3	7,3	10,2	11,6	16,1	16,9	16,7
…,2	13,5	19,2	24,7	27,7	30,2	8,2	9,8	14,4	19,1	23,3	22,4	11,3	17,3	19,6	23,3	26,5	27,9
…,1	16,1	18,3	22,3	20,3	19,0	3,6	3,4	4,1	10,3	15,2	18,8	3,2	4,0	5,3	8,8	13,4	16,8
…,3	15,2	19,7	24,8	26,0	32,2	7,6	10,7	17,0	23,3	25,3	26,2	10,2	16,7	19,8	23,7	24,8	28,7
…,3	19,6	24,1	29,4	31,8	37,7	7,4	9,3	13,3	21,3	27,2	29,2	9,2	13,4	13,0	17,6	17,9	29,2
…,1	16,8	25,1	28,8	28,2	30,3	8,4	13,5	18,0	20,8	26,3	25,0	10,2	12,3	17,6	22,9	29,0	28,8
…,2	20,3	20,3	30,3	23,2	28,3	13,8	18,7	15,8	25,4	23,1	28,7	15,8	20,2	16,3	29,8	28,7	24,8
…,2	16,3	21,5	27,3	27,4	31,8	10,0	14,2	16,8	23,2	26,7	24,1	7,9	12,9	17,5	25,5	31,3	28,3
…,6	14,4	18,9	21,5	21,3	23,3	8,6	10,8	15,4	23,4	23,5	25,3	7,4	11,0	20,0	21,9	21,1	26,9
…,4	15,7	16,6	19,7	19,1	21,7	10,6	15,0	14,3	21,2	24,1	25,8	11,2	16,8	17,4	22,4	26,9	21,2
…,4	15,9	19,9	22,8	24,1	24,5	11,9	14,2	16,5	20,8	24,7	26,8	11,3	13,6	19,2	15,3	20,9	24,6
…,9	15,3	16,2	18,4	22,5	24,0	11,2	15,1	17,2	20,1	24,9	27,3	13,1	17,4	19,0	19,2	23,8	25,3
…,4	12,3	15,6	16,2	18,5	21,0	7,9	10,8	13,3	16,7	17,3	19,8	8,4	13,2	13,7	16,2	15,6	23,0
…,3	12,3	15,4	19,5	21,8	24,5	9,1	12,1	13,6	17,2	20,7	23,2	9,6	12,8	15,3	19,2	18,1	22,8
…2,6	13,6	14,9	19,6	22,8	23,3	11,8	12,9	15,8	18,1	22,5	24,6	11,0	12,3	13,5	15,2	18,7	25,1
…0,7	16,2	18,8	23,7	22,7	26,4	8,3	12,2	14,1	16,7	20,2	26,4	9,0	11,5	13,2	14,9	16,0	18,8
…4,2	18,5	21,1	20,3	23,3	25,3	13,6	18,1	21,9	23,3	28,3	31,9	16,2	19,6	20,6	19,9	27,2	34,4
…4,2	18,8	19,9	21,2	22,6	28,3	16,2	23,0	20,3	26,8	26,9	31,9	18,5	24,5	22,5	25,7	28,8	27,7
…9,1	13,2	13,3	15,3	19,2	23,8	6,9	11,9	15,0	18,1	19,6	22,1	8,5	10,2	12,5	14,3	15,3	14,8
…2,8	19,8	22,1	23,6	22,8	27,8	15,1	18,4	21,4	23,2	27,3	30,9	14,3	15,8	23,0	27,2	25,8	27,1
…1,0	14,7	16,9	18,9	23,3	28,9	9,5	13,7	17,7	22,0	24,7	27,7	10,9	14,5	15,8	19,4	22,8	20,1
…3,3	20,6	23,8	27,1	28,8	28,1	10,7	16,3	18,5	23,2	26,8	24,9	12,0	14,8	12,6	19,2	20,3	25,3

Exposition dans le milieu définitif au bout de 7 jours de conservation à l'air humide.

…D'autres cubes seront rompus après 6 ans et d'autres briquettes après 6 ans et 10 ans.

TOURS

IMPRIMERIE DESLIS FRÈRES

6, rue Gambetta, 6

